



Sous la direction de
JIM AL-KHALILI

CE QUE
LA SCIENCE SAIT DU
MONDE
DE **DEMAIN**

Intelligence artificielle, transhumanisme,
menace climatique, surpopulation...

NOTRE VIE EN 2050

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Sous la direction de
JIM AL-KHALILI

CE QUE
LA SCIENCE SAIT DU
MONDE
DE DEMAIN

Traduction
André Cabannes et Lionel Pousaz

quanto

Version originale : *What's Next ? Even Scientists Can't Predict the Future – or Can They ?*

First published by Profile Books, London.

ISBN 978-1781258958

Sélection, Introduction et Chapitre 18 (Téléportation et voyages dans le temps)

Copyright © Jim Al-Khalili 2017

Copyright des autres chapitres : auteurs respectifs © Philip Ball, Margaret A. Boden, Naomi Climer, Lewis Dartnell, Jeff Hardy, Winfried K. Hensinger, Adam Kucharski, John Miles, Anna Ploszajski, Aarathi Prasad, Louisa Preston, Adam Rutherford, Noel Sharkey, Julia Slingo, Gaia Vince, Mark Walker, Alan Woodward 2017

Traduction française : André Cabannes et Lionel Pousaz

Maquette et mise en page : Kim Nanette

Couverture : flamidon.com

Première édition française 2018

© Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne

Quanto est un label des Presses polytechniques et universitaires romandes

Pour ce livre numérique (EPUB) : ISBN 978-2-88914-486-0

Édition imprimée : ISBN 978-2-88915-240-7

Tous droits réservés

Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur

Imprimé en France

Table des matières

Introduction

L'AVENIR DE NOTRE PLANÈTE

- 1 Démographie
- 2 La biosphère
- 3 Changement climatique

L'AVENIR DE L'HUMAIN

- 4 L'avenir de la médecine
- 5 Génomique et ingénierie génétique
- 6 Biologie de synthèse
- 7 Transhumanisme

L'AVENIR EN LIGNE

- 8 Le Cloud et l'« Internet des objets »
- 9 Cybersécurité
- 10 Intelligence artificielle
- 11 Ordinateurs quantiques

CRÉER L'AVENIR

- 12 Matériaux intelligents
- 13 Énergie
- 14 Transports

15 [Robotique](#)

[L'AVENIR LOINTAIN](#)

16 [Voyages interstellaires et colonisation du système solaire](#)

17 [Apocalypse](#)

18 [Téléportation et voyages dans le temps](#)

[Pour en savoir plus](#)

[Les auteurs](#)

Introduction

Jim Al-Khalili

Selon la théorie de la relativité d'Einstein, l'avenir est là qui nous attend, comme le passé et le présent, tous sont pré-existants et permanents dans un espace-temps statique à quatre dimensions. Notre conscience se limite toutefois à la perception du seul présent. Un présent en perpétuelle évolution, progressant le long de l'axe du temps, avalant l'avenir à mesure qu'il se présente et l'abandonnant aussitôt dans son sillage, une fois devenu passé. Nous sommes bien incapables de percevoir ce qui se trouve devant nous. En dépit de ce que prétendent médiums et diseuses de bonne aventure, deviner l'avenir nous est tout simplement impossible.

D'un point de vue métaphysique, la question de savoir si notre avenir est écrit ou au contraire ouvert, et si notre destin est figé dans un univers déterministe ou façonnable à souhait fait débat au sein de la communauté des scientifiques et des philosophes. Bien sûr, nous avons bien quelques certitudes puisque certains événements sont inéluctables : le Soleil continuera à briller (au moins quelques milliards d'années), la Terre continuera à tourner sur elle-même, tous nous vieillirons, et l'équipe de football dont je suis supporter, Leeds United, me décevra comme toujours à la fin de chaque saison.

Mais le futur peut se révéler totalement imprévisible. La civilisation humaine est si riche et diverse que certains événements se produisent alors même que personne ne les imaginait possibles. Et si quelques-uns avaient en effet bien prédit la victoire de Donald

Trump en 2016, personne n'a jusqu'à présent été en mesure d'indiquer où et quand aura lieu le prochain désastre, qu'il s'agisse d'un tremblement de terre ou d'un tsunami.

Les prédictions quant à la façon dont les progrès de la science et de la technologie affecteront nos vies couvrent un vaste registre depuis le certain jusqu'au totalement hypothétique. Quant à deviner l'avenir, les prévisionnistes les plus fiables et les plus imaginatifs en la matière sont probablement les auteurs de science-fiction. Mais combien d'entre eux, avant 1990, sont parvenus à anticiper un monde dans lequel Internet connecterait nos vies comme c'est le cas aujourd'hui ? Trente ans ont passé mais le World Wide Web reste une invention toujours aussi extraordinaire.

Alors, comment prépare-t-on à la fin de la deuxième décennie du 21^e siècle un livre sur les évolutions scientifiques qui se préparent, qu'elles soient imminentes, prévues d'ici cinq à dix ans, ou si éloignées que vous et moi ne les connaissons pas de notre vivant ?

Certains des essais qui composent ce livre constituent de sévères mises en garde quant au monde qui nous attend si nous n'agissons pas dès à présent. Les solutions aux problèmes globaux qui se posent exigeront des décisions tant sur le plan financier, géopolitique et culturel que scientifique. Notre connaissance du monde et la créativité que nous serons en mesure de déployer à partir des nouvelles technologies seront plus essentielles que jamais durant les prochaines décennies. C'est pourquoi ces textes se veulent également source d'espoir. Ils montrent comment la science peut contribuer à atténuer les scénarios du pire comme les effets dévastateurs du changement climatique, de la surpopulation ou du

développement de pandémies causées par les résistances bactériennes.

La mise en œuvre de nouvelles technologies issues de l'intelligence artificielle (IA), de la robotique, de la génétique, de la géo-ingénierie ou des nanotechnologies, pour ne citer que quelques-uns des domaines où le progrès va bon train aujourd'hui, devra être mûrement réfléchi et débattu. Nous ne pouvons nous permettre de plonger tête la première dans un avenir aussi incertain sans nous être au préalable interrogés sur les implications tant éthiques que pratiques de nos découvertes et de leurs applications. Par exemple, quant au fait que les robots commencent déjà à remplacer la main-d'œuvre. Ou quant au meilleur moyen de nous protéger du cyberterrorisme. Ou encore, quant à notre mode d'exploitation des ressources naturelles lorsque celui-ci s'accompagne de destruction massive d'habitats naturels et de menaces sur les écosystèmes alors même que la population mondiale croît en nombre et en voracité. Mais je vous dépeint un avenir des plus sombres alors qu'il n'en sera pas nécessairement ainsi.

Le savoir scientifique n'est en lui-même ni bon ni mauvais. Ce qui importe est l'usage que nous en ferons. Je peux vous assurer que dans une décennie ou deux nous aurons des villes administrées par l'intelligence artificielle, des voitures sans chauffeur, de la réalité augmentée, des aliments génétiquement modifiés, des formes nouvelles d'énergie présentant un meilleur rendement, des matériaux intelligents et des myriades d'appareils et de gadgets tous interconnectés et bavardant entre eux. Le monde sera méconnaissable par rapport à ce qu'il est aujourd'hui, tout comme le nôtre l'est comparé aux années 1970 ou 1980. Une chose est

certaine : nos vies continueront à être profondément transformées par les progrès de notre compréhension du monde, et par la façon dont nous mettrons nos connaissances à profit.

Certaines contributions de cet ouvrage collectif brossent un tableau relativement fiable de l'avenir. La science qu'elles décrivent est déjà là, dans une forme encore embryonnaire, mais nous pouvons d'ores et déjà entrevoir la façon dont elle se développera. D'autres présentent au contraire plusieurs scénarios possibles, non pas en raison de notre manque de compréhension des technologies concernées ou des surprises que pourraient réserver leurs applications, mais parce que notre avenir dépendra de la façon dont nous utiliserons ce savoir. Ces décisions devront être prises collectivement, par nous tous. Elles exigeront que nos dirigeants politiques se comportent de manière responsable et que les citoyens soient en mesure de les appréhender grâce à un minimum de culture scientifique.

Il est inévitable dans un ouvrage comme celui-ci, que certains sujets comme les voitures sans chauffeur, l'ingénierie génétique ou ce que l'on nomme l'Internet des objets soient abordés par plusieurs contributeurs. Nous avons délibérément conservé ces recouvrements car ils offrent plusieurs points de vue quant à la manière dont nos vies seront prochainement affectées. Ceci souligne également que nombre de ces nouvelles technologies sont interconnectées et que leur évolution ira de concert.

Certains essais, en particulier en fin d'ouvrage, sont d'autant plus spéculatifs qu'ils scrutent un avenir très lointain. Dans ma propre contribution au terme du livre, je m'attache à un futur très distant, bien au-delà de notre vivant. Mais que vaudrait un ouvrage

dédié à l'avenir de la science s'il n'abordait la question de la téléportation ou des voyages dans le temps ?

Certains des premiers chapitres proposent des scénarios plutôt pessimistes, surtout si les alarmes dont ils se font l'écho sonnent dans le vide. D'autres au contraire saluent les merveilleuses innovations technologiques qui enrichiront bientôt nos vies. Enfin il convient d'indiquer que cette collection d'essais n'a ni pour objectif d'être indûment alarmiste ni de proposer une célébration béate de l'avenir. Notre but est uniquement d'offrir une image aussi honnête que possible de ce à quoi notre futur ressemblera. Et c'est précisément l'objectif que se sont fixés chacun des experts mondiaux qui ont collaboré à ce livre.

Ces essais partagent tous une même caractéristique : ils se fondent sur notre compréhension actuelle des lois de la nature, c'est-à-dire sur une science factuelle et non fictionnelle. Ils ne présentent ni prédictions extravagantes ni révélations délirantes et ne font appel ni à la magie ni à la divination. Cette évaluation pondérée, reposant sur des faits, est à mon avis non seulement la plus honnête mais ce qu'elle laisse entrevoir est également le plus extraordinaire.

L'AVENIR DE NOTRE PLANÈTE

Démographie, préservation
et changement climatique

1 Démographie

Philip Ball

Le monde change car nous changeons. Comme la plupart des vérités qui vont sans dire, c'est une évidence une fois qu'on l'a énoncée. L'avenir sera différent car nous aurons non seulement inventé de nouvelles technologies, mais également choisi lesquelles inventer et lesquelles utiliser – et lesquelles nous laisserons en retour nous transformer. Certaines résoudront des problèmes existant depuis longtemps, d'autres en créeront de nouveaux ; d'autres encore effleureront à peine les grands défis qui se posent pour notre futur. Quoi qu'il en soit, nous ne pouvons pas nous contenter d'une simple extrapolation de nos environnements actuels pour anticiper l'avenir. Alors, en quoi serons-nous différents et dans quelle mesure vivrons-nous différemment ?

Bouches à nourrir

L'un des facteurs majeurs du changement est aujourd'hui celui de la croissance démographique qui doit sa réalité aux progrès technologiques accomplis par l'homme. Notre planète ne pourrait supporter ses 7,5 milliards d'habitants sans les évolutions que l'agriculture et la production de denrées alimentaires ont connues depuis le 19^e siècle : en particulier ce qu'on appelle la « révolution verte » et qui au cours du 20^e siècle a combiné mise au point de variétés de cultures à haut rendement et accès généralisé aux

engrais artificiels. Sans ces avancées, des milliards de personnes seraient déjà mortes de faim.

Il n'est toutefois pas assuré que notre planète puisse supporter plus de neuf milliards de bouches à nourrir, comme le prévoient les projections pour 2050, sans le développement d'innovations importantes en matière de production agricole et alimentaire, et de gestion des ressources en eau. La majeure partie de la croissance démographique se produira en Afrique et en Asie, c'est-à-dire dans des pays ne disposant ni des moyens économiques ni des infrastructures leur permettant d'y faire face.

Il n'y a encore aucune garantie que la croissance de la productivité agricole suivra celle de la population. On s'attend au contraire à ce que le changement climatique – qui accélère l'érosion des sols, la désertification et l'appauvrissement de la biodiversité – réduise la productivité dans une grande partie du monde, y compris dans de nombreuses régions où la croissance démographique entraînera une augmentation des besoins alimentaires. À ces changements s'ajoutent également l'instabilité des marchés mondialisés : les modifications de la demande ou des priorités en un endroit donné (comme la réorientation de cultures vivrières vers les biocarburants) qui peuvent avoir des conséquences importantes sur la production ou l'offre de nourriture ailleurs. La sécurité alimentaire restera donc une question primordiale dans la perspective d'un avenir viable pour tous. Déjà, une flambée des prix des denrées alimentaires en 2008 a déclenché des troubles sociaux à grande échelle en Haïti qui ont conduit à la chute du gouvernement. L'augmentation des prix de l'alimentation en 2011 a également

contribué aux soulèvements du « Printemps arabe » en Afrique du Nord.

Les perspectives ne sont guère meilleures en ce qui concerne l'eau. Actuellement 750 millions de personnes n'ont pas accès à des ressources suffisantes en eau potable. Elles pourraient être au nombre de trois milliards en 2025, les réservoirs naturels d'eau douce étant déjà surexploités dans les régions arides allant du Midwest américain à la grande plaine de Chine du Nord.

On pourrait considérer tout ceci comme un récit catastrophiste, une prophétie de malheurs, l'annonce de l'effondrement de la civilisation et la fin du monde. Ou au contraire comme une liste de défis politiques et technologiques à relever. Mais plus encore, comme un rappel de ce que devront être nos priorités à l'avenir. Certes la médecine personnalisée, les robots intelligents, l'exploitation minière des astéroïdes et la régénération d'organes sont des sujets passionnants (ou effrayants, selon le point de vue). Mais la disparition des besoins essentiels de l'humanité – comment nous nourrirons-nous et que boirons-nous – n'est pas pour demain. En réalité ce seront probablement ces mêmes questions – plus encore que les innovations en informatique, transports ou médecine – qui dicteront la forme à venir de nos relations, tant entre individus qu'entre nations.

Ce dont nous avons besoin c'est d'un système basé sur la *durabilité*. Le terme est aujourd'hui galvaudé, et souvent dénué de la réflexion qui devrait l'accompagner. Certains économistes balayent de la main les questions posées par une croissance démographique incontrôlée en pariant sur l'innovation et l'ingéniosité humaine pour résoudre le problème. D'autres au contraire questionnent l'impératif

de croissance économique sans limite enjoint par les marchés, qui relègue au second plan les impacts écologiques, et qu'ils perçoivent comme illusoire et impossible à tenir à long terme. Les partisans des deux camps ne manquent ni de données ni d'arguments pour valider leurs vues. Mais ce que tous oublient est que la science a déjà un cadre de pensée, à savoir la thermodynamique, et que celle-ci impose des limites aux options possibles. Rien ne se matérialise – pas de production de denrées alimentaires, pas d'idées nouvelles, pas de maintenance métabolique d'une société – sans coût énergétique ni production de déchets. Bref, rien n'est gratuit. Les sociétés sont des écosystèmes complexes mais soumis aux mêmes règles que les autres : ce sont des réseaux imbriqués d'éléments en relation, ayant besoin d'énergie, combattant l'augmentation d'entropie, adaptables mais également vulnérables. La mise sur pied d'une véritable science de la durabilité est sans aucun doute le défi le plus important que nous aurons prochainement à relever. Sans celle-ci, le reste n'a guère d'importance. Après tout, notre présence dans l'univers n'a rien d'indispensable.

Le changement de nos sociétés

Qui deviendrons « nous » ?

Sous les effets combinés d'une longévité croissante et d'un taux de natalité en chute, l'âge moyen de la population augmente. Le nombre de personnes âgées de plus de 75 ans au Royaume-Uni passera de 5,1 millions en 2012 à environ 6,6 millions en 2022 ; soit en proportion de 8% à 9,7%. En 2050, un tiers des habitants des pays développés seront sexagénaires ou plus, ce qui accentuera

notamment la pression sur les systèmes de santé et réduira en proportion la part de la population active.

Nous devons aussi nous poser la question de savoir « où vivrons-nous » ? Au début du 21^e siècle la population mondiale a franchi un cap important : d'après un rapport des Nations Unies de 2007, plus de la moitié des habitants de la planète vivent dans des villes. Pour la majeure partie de l'humanité l'avenir est donc urbain.

Il existe déjà beaucoup de mégalofoles de plus de 10 millions d'habitants situées principalement dans des pays d'Asie, d'Afrique ou d'Amérique du Sud, comme Bombay, Lagos, São Paulo ou Manille. On prévoit que la croissance démographique des deux prochaines décennies se produira principalement dans des villes situées dans des pays en développement. En 2035, près de 60% de la population mondiale sera urbaine.

Dans les contes on partait chercher fortune dans le vaste monde ; c'est désormais dans les villes qu'on ira la chercher. La plupart de ceux qui quittent les campagnes le font dans l'espoir d'une vie meilleure, mais beaucoup de cités ne parviennent pas à absorber un tel afflux ; on estime désormais à 150 millions le nombre d'urbains souffrant de pénurie d'eau. En outre, les villes en croissance rapide construites au niveau de la mer dans les régions littorales présentent un risque important d'être un jour submergées par la montée des eaux, auquel s'ajoute la probabilité d'événements climatiques extrêmes de plus en plus fréquents comme le laissent entrevoir les modélisations du changement climatique et de ses conséquences.

Pas besoin d'être devin pour prédire que les États-Unis poursuivront leur déclin, et je ne parle même pas là des nuages qui

s'amoncellent sur le projet d'unification européenne. Si vous avez encore quelques doutes, un simple coup d'œil à l'évolution des mégalofoles du monde vous indiquera où se déplaceront les centres de gravité ces prochaines années. En 1950, les plus grandes villes étaient dans l'ordre New York, Tokyo, Londres, Osaka et Paris. En 2010, elles étaient devenues Tokyo, New Dehli, Mexico, Shanghai et São Paulo. En 2030, on prévoit que la liste sera Tokyo, New Dehli, Shanghai, Bombay et Pékin. Pour suivre l'épicentre du futur, il faudra partir vers l'Est.

Bien sûr, c'est une chose pour une ville de croître, mais c'en est une autre de prospérer ; les favelas de Rio de Janeiro et de São Paulo le rappellent. Qu'importe, il fait peu de doute que la Chine et l'Inde poursuivront leur métamorphose en superpuissances. Au cours des 20 prochaines années, on s'attend à ce que la Chine construise entre 200 et 300 villes entièrement nouvelles, dont beaucoup dépasseront le million d'habitants. Dans les faits, l'équivalent d'une ville d'un million et demi d'habitants est ajouté à la planète *chaque semaine*.

Mais à quoi ressemblera la ville du futur ? La vue d'artiste typique miroitante de verre et de chrome surmontée de verdure est très séduisante, mais elle est également très trompeuse car il n'existe pas *une* ville du futur. Il est vraisemblable que certaines deviendront plus agréables à vivre, plus vertes et plus vivantes qu'aujourd'hui. Tandis que d'autres s'étaleront en un borbier de bidonvilles parfois rehaussé en son centre d'un quartier d'affaires étincelant, avec à la clé des disparités de revenus bien supérieures à celles que l'on connaît aujourd'hui. Est-il d'ailleurs seulement possible de planifier une ville idéale, ou est-il au contraire préférable

– comme l’ont soutenu certains théoriciens comme Lewis Mumford et Jane Jacobs – de laisser croître cet ensemble de manière « organique » pour qu’il devienne animé et prospère plutôt que stérile et sans âme ?

Certains scientifiques pensent qu’on ne pourra répondre à ces questions tant qu’une véritable « science des villes » n’aura été élaborée, plutôt que de s’en remettre comme à l’accoutumée aux visions souvent arbitraires, normatives et politisées des urbanistes et des architectes. Il existe quelques signaux avant coureurs qu’une telle discipline est sur le point de naître : on commence par exemple à comprendre qu’il existe des traits communs à toutes les villes quelles que soient leur taille et leur caractère. Les métropoles présentent en effet toujours des économies d’échelle : plus elles sont grandes moins elles nécessitent d’infrastructures et d’énergie par habitant, et plus le revenu moyen y est élevé tout comme leur production d’innovation. Mais tout croît parallèlement plus vite, le bon comme le mauvais : les grandes villes affichent également des taux de criminalité, de vols et de maladies infectieuses élevés et, de façon générale, le rythme de vie y est plus rapide, que ce soit celui de la création et de faillites d’entreprises, ou de la vitesse de déplacement des piétons. Il semble donc qu’on ne puisse jouir des avantages des villes sans en subir également les inconvénients. Alors faites votre choix, si vous avez la chance de pouvoir le faire.

La migration vers les villes est l’une des tendances de l’exode général que l’on observe à travers toute la planète. Les Nations Unies estiment qu’à l’heure actuelle plus de 200 millions de personnes ont émigré d’un pays vers un autre, et qu’environ 750 millions ont changé de lieu de résidence à l’intérieur même de

leur propre pays ; ces dernières décennies, ce mouvement a principalement consisté en une migration depuis les zones rurales et montagneuses vers les villes.

Comment expliquer ces déplacements ? Dans les pays à bas revenus la plupart des gens changent de lieu de vie pour des raisons économiques, à la recherche d'un meilleur travail, de salaires plus élevés, ou tout simplement d'une vie offrant plus de variété, surtout si l'activité agricole ne leur permet plus d'en vivre. Certains se déplacent pour se rapprocher des zones d'éducation ou de membres de leur famille. D'autres fuient les persécutions politiques, culturelles ou religieuses, les guerres et les conflits, comme c'est le cas en Syrie. D'autres encore sont déplacés de force pour des motifs sociopolitiques, comme en Chine en raison de la construction de barrages. Enfin, certains sont contraints de partir suite à des catastrophes naturelles comme les inondations, les sécheresses ou leurs terres devenues stériles.

Le changement climatique accélérera inévitablement les migrations dans les années et les décennies à venir, mais le terme de « migrants climatiques » est à manier avec précaution. Les changements environnementaux peuvent en effet interagir de façon complexe avec d'autres causes migratoires. Depuis le début du millénaire, la sécheresse au Zimbabwe s'est surajoutée à la crise économique et la situation politique du pays, chassant entre 1,5 et 2 millions de personnes vers l'Afrique du Sud voisine où elles ont reçu un accueil souvent hostile. Par ailleurs, les mouvements provoqués par les changements environnementaux compliquent la distinction établie dans les milieux politico-juridiques entre « migration » et « déplacement » ; la première est considérée

comme un choix, tandis que le second résulte d'une contrainte. Il n'est pas toujours aisé de déterminer si les conditions locales sont suffisamment dégradées pour parler de migration involontaire ou non, mais il ne fait guère de doute – au vu de ce que l'Europe vit depuis quelques années – que l'exode et l'immigration demeureront des questions politiques ouvertes pour de nombreuses années encore.

Technologies de l'identité

Les évolutions technologiques à l'œuvre peuvent paraître bien éloignées des préoccupations quotidiennes des populations rurales d'Afrique ou des tribus nomades de Mongolie – exception faite d'une chose : grâce au téléphone portable elles sont tout autant connectées que le reste du monde.

Deux personnes sur trois dans le monde possèdent maintenant un téléphone portable (ou du moins un abonnement), même dans les pays les moins développés d'Afrique subsaharienne. Ces appareils sont aujourd'hui devenus le principal moyen de communication. L'accès à Internet n'est pas aussi répandu : dans les pays développés quatre foyers sur cinq en sont équipés, mais le ratio tombe en dessous d'un sur dix dans les pays les plus pauvres. La crainte d'une fracture technologique ou digitale n'est donc pas imaginaire, mais l'équation est loin d'être simple. Sans surprise on observe également cette fracture dans la pyramide des âges. Au Royaume-Uni lors du recensement de 2016, 99% des jeunes entre 16 et 24 ans ont selon leurs déclarations utilisé Internet au cours des

trois mois précédents, contre seulement 39% des personnes de plus de 75 ans.

L'accès au web n'est qu'un des aspects des choses : l'utilisation des réseaux mobiles a également fait évoluer les mentalités vers un état de « connexion permanente ». La Génération Z, née dans les années 1990, n'a jamais connu l'époque où ces moyens n'existaient pas et elle parvient maintenant à l'âge adulte. En Grande-Bretagne une enquête en 2011 auprès des 16-24 ans révèle que pour 45% d'entre eux le moment où ils se sentent le plus heureux est lorsqu'ils sont en ligne. Désormais, beaucoup d'entreprises attendent de leurs employés qu'ils soient joignables en permanence par mobile ou par e-mail ; les affaires privées peuvent également être gérées depuis le bureau, effaçant ainsi la barrière entre identités professionnelle et personnelle.

Les statistiques de ce type abondent mais ce qu'elles tendent à montrer n'est pas encore évident. Une extrapolation simple des tendances actuelles suggère que les trois quarts de la population mondiale possédera un téléphone portable avant la fin de la prochaine décennie. Mais les conséquences d'un accès mobile pour un fermier kényan ou un nomade mongol sont tout à fait différentes de celles pour un trader de la City londonienne.

La dissémination sans précédent des technologies de l'information et des médias sociaux suffit à les qualifier de « disruptifs » – mais que vont-ils transformer ou bouleverser au juste ? Il a été un temps exaltant d'imaginer que les soulèvements du « Printemps arabe » de 2011 étaient des « révolutions Twitter », mais cette évidence a depuis largement été remise en question.

Le monde de l'« interconnexion informationnelle » n'est qu'une facette d'une tendance plus vaste à l'interdépendance généralisée entre le commerce, les voyages, les maladies infectieuses, la censure, la vie privée et beaucoup d'autres choses. En d'autres termes, un ragoût enivrant, mais dont personne ne peut dire encore à l'heure actuelle quelle saveur il aura à l'avenir. Voici toutefois quelques enseignements de ce que l'expérience montre à ce stade :

- Être interconnecté ne signifie pas « appartenir ». Au contraire cet état engendre une balkanisation des vues, durcissant les propos politiques et encourageant ou renforçant les positions extrémistes. Globalement, Internet ou les médias sociaux inclinent peu à la largeur de vue et, d'une certaine manière, leur principe même nous isole de toute remise en question en nous laissant par exemple la possibilité de personnaliser notre fil d'actualités. Il fallait jusqu'à peu faire quelques efforts pour lire ou entendre des thèses négationnistes ; il suffit maintenant de quelques clics.
- Tout comme les technologies de l'information peuvent amplifier les idées préconçues et les vues erronées, elles peuvent également accentuer les inégalités. Dans les affaires et le commerce, dans les arts, les loisirs et la célébrité médiatique, les marchés suivent désormais une tendance de type « le gagnant rafle la mise ». Ceci, révèlent les études de psychologie, est précisément ce à quoi il faut s'attendre avec les systèmes d'évaluation grâce auxquels nous pouvons aisément voir quels choix ont fait les autres.
- Si une tâche peut être assurée par un robot, soyons certains qu'elle le sera un jour. De nombreuses transactions

financières sont par exemple déjà réalisées par des algorithmes automatisés. L'opération s'effectue beaucoup plus vite qu'avec des opérateurs humains mais elle présente cependant des règles singulières que nous ne comprenons pas encore très bien. Cette automatisation va peu à peu s'étendre à des tâches de plus en plus sophistiquées, y compris dans les domaines de la santé et de l'éducation. Cette situation présentera certainement des avantages : les robots-médecins ne dorment jamais et il ne sera donc plus nécessaire d'attendre des semaines avant d'obtenir un rendez-vous. Un robot en connaîtra d'ailleurs beaucoup plus sur votre état de santé (à l'aide d'implants-capteurs et de données génomiques) que votre médecin n'en a jamais su. Mais les robots vont également modifier le marché du travail, et si l'histoire nous a appris quelque chose, c'est bien que ceux qui ne tirent aucun profit des augmentations de productivité seront les premiers à se retrouver privés de tout pouvoir économique, et alors même qu'ils devraient au contraire jouir de plus de loisirs.

- Votre capital le plus important ne consiste peut-être déjà plus en vos compétences, vos connaissances ou votre santé, mais en votre réputation, c'est-à-dire à la façon dont les autres vous évaluent, par exemple sur les forums en ligne. Ce qui veut dire que vous devrez apprendre à gérer cette réputation et à en prendre soin, ou à déléguer cette tâche à quelqu'un d'autre comme le font déjà les entreprises.

Ces tendances ne pointent pas encore clairement dans une seule direction. Beaucoup présentent des éléments contradictoires : les

mensonges sont plus faciles à démasquer mais également plus faciles à répandre. Plus important encore, aucun de ces changements ne se déploie dans une bulle sociopolitique uniforme : ce qu'ils signifient en Chine est différent de ce qu'il en est en Suède ou en Iran.

On peut cependant et sans trop de risque tirer la conclusion suivante quant à l'avenir de nos individualités : l'identité devient une notion beaucoup moins fixe et plus protéiforme qu'elle ne l'a jamais été – ou du moins – qu'on ne le pensait. Nous avons tous des identités multiples qui se manifestent plus ou moins selon la situation, se chevauchent parfois, mais qui toutes participent à la définition de nos vues ou de nos choix d'une manière qui nous est propre. Mais les catégories sociales traditionnelles qui définissaient l'identité, comme l'âge, la classe sociale ou la nationalité, sont aujourd'hui devenues moins déterminantes, tout comme l'est la distinction entre identité publique et identité privée. Les définitions de l'identité jusqu'à présent fondées sur la classe sociale, l'appartenance ethnique ou l'affiliation politique vont probablement céder le pas à de nouvelles catégories comme le rural vs. urbain ou le diplômé vs. non qualifié.

Si les attributs traditionnels de l'identité individuelle deviennent de plus en plus fragmentés au cours de la prochaine décennie, il faudra s'attendre à ce que les communautés présentent également moins de cohésion. Ce qui pourrait avoir comme conséquence une moindre mobilité sociale et l'apparition de phénomènes de marginalisation, de ségrégation et d'extrémisme. D'un autre côté, l'hyper-connectivité peut aussi renforcer l'identité de groupe de manière positive en offrant de nouvelles possibilités de construction

de communautés. Nos vies et nos identités toujours plus connectées conduiront-elles au meilleur ou au pire ? En fait les deux – et plus encore qu'on ne le croit.

L'avenir de la démocratie et de la religion

L'essai de Francis Fukuyama *La fin de l'histoire et le dernier homme* publié en 1992, est aujourd'hui devenu la risée des critiques de la futurologie : si vous le lisez maintenant, retenez-vous de rire à l'idée qu'il exprimait alors, à savoir qu'après la chute du mur de Berlin et de l'Union soviétique, les démocraties libérales constitueraient la forme logique ultime de tous les États développés. Il existe aujourd'hui et plus que jamais de nombreuses raisons de douter des prévisions de Fukuyama. Il est non seulement évident que l'accès à la stabilité démocratique restera hors de portée d'une grande partie du monde – celle-ci ne se matérialisant pas comme par magie après le renversement d'une dictature – mais il n'est également pas garanti qu'elle perdure une fois installée. Le populisme démagogique actuellement à l'œuvre en Europe et aux États-Unis menace de transformer certaines démocraties libérales en régimes « d'homme fort » maintenus en place par la coercition, la corruption et la collusion, à la façon de la Russie, de la Chine ou de l'Asie du Sud-Est. Il y a aujourd'hui un véritable débat quant à la question de savoir si les termes « démocratie » et « libérale » peuvent rester indéfiniment associés, et si le capitalisme débridé – avec ses fictions économiques et sa tendance à favoriser les inégalités et le ressentiment – est compatible tant avec l'un qu'avec l'autre.

En bref, les intellectuels occidentaux ne sont plus persuadés d'avoir élaboré la meilleure forme de gouvernance, et encore moins de savoir comment la faire émerger ailleurs. Le politologue David Runciman a souligné que la force de la démocratie – qui est d'être résiliente à tous types de chocs – est également son talon d'Achille puisqu'elle n'incite guère à tirer les leçons du passé. Progresser cahin-caha paraît encore suffisant pour le moment – jusqu'au jour où cela ne le sera plus.

Il faut donc cesser de se représenter la politique comme une sorte de réaction chimique qui bouillonnerait pendant un certain temps jusqu'à ce que ce qu'elle résulte en un état stable et satisfaisant. L'impermanence est plutôt ce qui la caractérise, et les politologues parlent de plus en plus de processus « discontinu » qui se déroulerait non pas de manière graduelle mais par secousses sismiques épisodiques.

Parmi les bouleversements que nous pouvons anticiper figurent ceux relatifs à la religion. La question n'est en effet pas tant de savoir quelle sera la place de la religion à l'avenir, mais plutôt de quelle religion il sera question. Les « quatre grandes » – l'islam, la chrétienté, le bouddhisme et l'hindouisme – éclipsent sans doute progressivement toutes les autres. L'athéisme, revendiqué par environ 16% de la population mondiale – et bien davantage en Europe occidentale – progresse moins vite que les principales croyances religieuses (à l'exception du bouddhisme qui décline relativement). La proportion globale des musulmans est celle qui croît le plus rapidement ; elle aura probablement rejoint celle des chrétiens (soit 30%) en 2050.

Quelle que soit votre opinion sur ces tendances, il convient de les aborder avec le même état d'esprit que s'il s'agissait d'étudier la diffusion d'autres caractéristiques culturelles comme le langage – en particulier si, comme celui-ci, la religion ne peut être isolée d'autres facteurs comme la croissance démographique ou le développement économique. La foi religieuse affectera encore profondément nos vies, pour le meilleur ou pour le pire. L'histoire nous a appris que la religion n'est pas nécessairement anti-intellectuelle, anti-science, anti-démocratique ou anti-humaniste. Mais qu'elle peut l'être également.

À long terme...

La meilleure science-fiction n'est pas celle qui vise à prédire l'avenir. Les histoires à succès, comme *La Guerre des Mondes*, *Le Meilleur des Mondes*, 1984, le film *Blade Runner* (et le roman *Les Androïdes*, de Philip K. Dick, dont il est tiré) ou *Bienvenue à Gattaca*, le film de 1997 sur la ségrégation génétique, utilisent la liberté créatrice qu'offre l'avenir pour explorer les angoisses du présent. Il n'y a donc aucune raison de se plaindre de l'absence aujourd'hui des réacteurs personnels, des bases lunaires ou des robots-serviteurs promis autrefois : ces innovations n'ont jamais été d'actualité.

Néanmoins même la meilleure science-fiction tombe parfois dans le travers d'imaginer ce que la technologie fera pour nous, alors qu'elle ne sera en réalité rien d'autre que ce que nous en ferons. Les technologies ne nous sont rarement, pour ainsi dire jamais, imposées, même si nous en avons l'impression. Elles arrivent car collectivement nous les acceptons, nous les accueillons

et nous les transformons en normes, au point d'en faire un usage compulsif. Avant l'apparition des téléphones portables et des réseaux sociaux, nous n'avions guère idée de notre degré de narcissisme, ni à quel point nous voulions désespérément échapper à la réalité du quotidien et combler notre sentiment de solitude. Nous n'aurions jamais imaginé le degré de confiance sur lequel reposent aujourd'hui les échanges commerciaux (e-commerce), à quel point nous détestons les avis contraires aux nôtres (chambre d'écho médiatique), ni comme nous sommes fascinés par la banalité (télé-réalité) et comme l'anonymat peut nous rendre agressifs (trolls).

La futurologie doit donc nous forcer à nous regarder dans le miroir. C'est une chose d'imaginer, disons, un futur transhumaniste dans lequel nous aurions accédé à l'immortalité en combinant nos corps et nos esprits aux technologies de l'information et en téléchargeant nos pensées vers quelque disque dur quantique. Que ceci soit ou non de l'ordre du fantasme (ce que j'ai tendance à croire), cette vision est avant tout révélatrice de nous-même. Elle indique simplement que notre rapport à la mort et à la sénescence sera d'une façon ou d'une autre l'un des prochains déterminants du changement social. C'est pourquoi je recommande de considérer plusieurs des prévisions indiquées dans ce livre non pas comme des descriptions hypothétiques de l'avenir, mais plutôt comme des reflets de ce que nous souhaiterions qu'il devienne.

Quand nous nous posons la question de savoir « Qui deviendrons-nous ? », les organismes gouvernementaux ont tendance à produire des rapports bourrés de statistiques et de schémas reposant essentiellement sur des extrapolations graduelles du ici et maintenant. Les futurologues imaginent pour leur part un

« changement discontinu » et des « singularités » : une rupture abrupte du statu quo, une fracture dans les graphes due à une technologie imprévue ou à une crise politique. Les artistes et les écrivains proposent quant à eux de véritables voyages oniriques parfois extraordinaires voire déjantés et teintés de satire. Nous vivrons dans un *Meilleur des Mondes* ; nous serons devenus une espèce fabriquée dans les chaudrons d'un Incubateur Central ; nous vivrons sur une planète qui aura disparu sous une forêt de mégatours, chacune d'entre elles constituant une nation entière ; ou encore au milieu des ruines d'Armageddon, racontant des légendes de merveilles technologiques disparues dans un patois rabelaisien dégradé. Qu'importe. Nous avons quoi qu'il en soit besoin de toutes ces données chiffrées, de toutes ces transitions, de toutes ces visions. Non pas parce qu'elles nous donneront la réponse, mais parce qu'elles nous permettront d'identifier et de déjouer les pièges que nous nous tendons à nous-mêmes. Comme l'a dit un jour avec une délicieuse ambiguïté, l'écrivain américain Richard Powers : « Les gens veulent tout ; c'est bien là leur problème. »

2 La biosphère

Gaia Vince

L'aube sur la côte pacifique du Costa Rica et la silhouette bleu nuit d'un homme au bord de l'eau s'animent à mesure que le ciel rosit. J'éteins ma lampe torche. Jairo Quiros Rosales et moi sommes seuls sur cette plage de sable noir qui s'étend sur des kilomètres vers le nord. Jairo me fait signe de venir, et j'accours vers lui, en scrutant du regard la plage et la limite sombre du rivage. Avec la lumière naissante, je distingue les lugubres vautours, petites taches dans le lointain, et les chiens errants qui les accompagnent, surgissant de l'obscurité pour venir flairer l'odeur de la nuit dans les sables.

C'est alors que je les vois : à 100 mètres plus loin sur la plage, telles d'étranges grosses pierres toutes de la même forme arrondie, des centaines de tortues olivâtres sortent de l'océan pour venir pondre leurs œufs. C'est ce qu'on appelle l'*arribada*, l'« arrivée » en espagnol. Ça fait plus d'un mois que j'attends cet événement. Dans mon excitation, je saisis Jairo par le bras et l'entraîne vers les tortues. Il est un peu surpris, mais me sourit. Bien que ce soit la première fois que nous nous rencontrons, nous partageons déjà une certaine proximité grâce au téléphone – disons que mes coups de fil incessants pour lui demander quand l'*arribada* aurait lieu m'ont peu à peu rapprochée de ce timide chercheur costaricain. Nous échangeons dans un charabia d'anglais et d'espagnol. Son anglais est meilleur que mon espagnol, mais comme souvent, certains

concepts s'expriment mieux dans une langue que dans une autre. *Arribada* est de ceux-là.

La plupart des tortues de mer pondent individuellement à diverses périodes de l'année ; leur descendance voit ainsi le jour à des moments et des endroits impossibles à anticiper pour les prédateurs. Mais les tortues olivâtres (et leurs proches cousines, les tortues de Kemp) ont développé une stratégie toute particulière de ponte en masse. En se synchronisant, elles parviennent à donner naissance à tellement de jeunes tortues au même moment que les prédateurs se trouvent dépassés par le nombre, et ne parviennent pas à toutes les manger. On appelle cela la « saturation du prédateur ». L'arrivée en masse de tortues olivâtres n'a lieu que dans de rares endroits dans le monde, comme la plage d'Ostional au Costa Rica où je me trouve aujourd'hui.

Tandis que nous marchons le long de la limite luisante du sable, les tortues sortent de l'eau sans discontinuer, tel un débarquement de tanks – une armada maternelle de reptiles ancestraux, poussés par leurs hormones à venir déposer leur précieuse cargaison. Jairo tend le bras et me montre vers la mer une rangée de carapaces parallèle au rivage, agitée par les vagues, et de petites têtes se relevant périodiquement pour respirer en attendant leur tour. La plage semble véritablement onduler devant nous, couverte de toutes ces grosses coquilles en forme de cœur qui rampent les unes à côté des autres dans la précipitation. Plusieurs milliers d'entre elles se pressent maintenant sur la plage. Certaines, leur tâche accomplie, retournent vers l'océan en tirant péniblement leurs lourdes carapaces contre le flux de leurs congénères encore pleines, à l'aide de leurs nageoires mal adaptées à la terre ferme. Épuisées, elles

attendent alors au bord de l'eau la vague qui les emportera vers le large.

Je suis captivée par ce merveilleux phénomène. « *Maravilloso* », laisse échapper Jairo en se tournant vers moi. Il est debout depuis deux heures du matin, et bien qu'il ait déjà été témoin de ce spectacle, il est lui aussi manifestement ému. Les tortues de mer vivent habituellement à l'abri des regards dans leur monde sous-marin. J'en ai parfois vu de près au cours de mes plongées, et j'ai eu la chance de pouvoir les contempler se mouvoir, sans effort, avec une grâce surprenante. Il est rare de voir d'aussi grands animaux sauvages de près, et surtout autant à la fois. Être entourée d'autant d'individus est une sensation incroyable. Les tortues olivâtres, comme toutes les tortues marines, sont menacées de disparition, et ce à cause de nous.

Ces dinosaures vivants à carapace épaisse ne sont que l'une des 23 000 espèces menacées d'extinction dans le monde. L'homme domine désormais la planète de façon si absolue qu'il est en train de rayer les animaux et les plantes sauvages de la face du monde. Nous utilisons déjà plus de la moitié des terres émergées pour notre nourriture, nos villes, nos routes et nos mines ; nous consommons 40% de la production primaire nette de la planète (c'est-à-dire l'ensemble de ce qui est produit par les plantes et les animaux), et nous contrôlons les trois quarts de toutes les ressources en eau douce. Nous sommes à présent les grands animaux les plus nombreux sur Terre, devant ceux que nous avons nous-même créés grâce à l'élevage, pour nous nourrir ou pour nous servir. Les changements planétaires qui nous sont attribuables menacent maintenant une espèce sur cinq de disparition, soit

environ mille fois le rythme naturel d'extinction. Nous avons perdu la moitié de notre faune sauvage au cours des quarante dernières années, et les biologistes indiquent que nous entrons maintenant dans la sixième phase d'extinction de masse de l'histoire de la Terre. Les précédents événements similaires, y compris celui qui a éliminé les dinosaures, ont jusqu'à présent tous été la conséquence de phénomènes cataclysmiques comme des impacts d'astéroïdes géants ou de super-éruptions volcaniques.

Le monde naturel est sous le choc de l'impact global de l'homme, et pour les tortues comme pour beaucoup d'autres espèces, la situation empire. Devons-nous toutefois nous en soucier ? Est-il au fond si grave que nous perdions autant d'animaux, que nous ne croisons de toute façon pas ou presque jamais ? La relation de l'humanité avec la nature est complexe ; pour comprendre le processus d'extinction en cours, il nous faut examiner la façon dont nos vies et nos moyens de subsistance ainsi que nos désirs et nos motivations sont intimement liés à l'environnement global qui est le nôtre.

L'expérience de l'*arribada* est à mon avis un éclairage unique d'un problème planétaire qui dépasse de loin le destin de quelque espèce que ce soit. Les détails varient bien sûr selon les espèces animales ou végétales qui s'efforcent de survivre sur cette planète dominée par l'homme, mais le schéma général et l'émotion qu'il provoque sont universels. Ce qui rend Ostional si extraordinaire est que les habitants locaux ont en effet trouvé un moyen d'exploiter leur ressource naturelle tout en la protégeant. Et c'est là la clé du problème : nous ne pourrions protéger la faune et la flore sauvages

si nous ne nous préoccupons pas également des besoins de ceux qui en vivent.

Tandis que nous marchons sur le sable, Jairo compte les tortues, estimant leur nombre entre des postes de garde régulièrement disposés sur la plage, en notant les carapaces et les curieuses traces, pareilles à des chenilles de char d'assaut qu'elles laissent derrière elles lors de leur périple aller et retour. Plus tard, d'autres chercheurs feront des décomptes plus précis, explique-t-il, mais il y a là à première vue, plus de 10 000 tortues dans cette *arribada*. Certaines seront marquées, mesurées, et les informations entrées dans une base de données internationale pour que leurs déplacements puissent être suivis à la trace. Mais avant cela il veut me montrer quelque chose.

« *Venga* » (viens), me dit-il, avant de m'emmener vers le haut de la plage, où l'estran plat et humide cède la place à des dunes sèches aux formes douces. C'est ici, au-dessus de la ligne des plus hautes eaux que pondent les tortues. L'une d'elles parvient à notre hauteur et commence à creuser à l'emplacement qu'elle a choisi près de nous. Jairo et moi nous accroupissons pour la regarder. Elle utilise ses nageoires antérieures comme des pelles pour évacuer le sable de part et d'autre, recouvrant du même coup fréquemment mes pieds. Elle creuse un trou de plus en plus large et profond, accomplissant un rituel pratiqué depuis des millions d'années, en un temps où les reptiles régnaient en maîtres sur une Terre alors plus chaude et sauvage. Un temps où les animaux atteignaient des tailles gigantesques (comme la tortue Archelon qui, il y a 70 millions d'années, pouvait mesurer près de trois mètres ou, plus proche de nous, la Stupendemys, qui pesait jusqu'à deux tonnes) ; une

carapace constituait alors une protection adéquate et suffisante contre les prédateurs. Il n'y avait bien entendu pas d'êtres humains sur Terre, ni quoi que ce fût qui y ressemblât de près ou de loin. En quelques minutes à peine le trou est prêt ; elle se retourne et s'y enfonce à reculons queue la première. Elle utilise désormais ses nageoires postérieures pour approfondir plus encore l'excavation, rejetant toujours plus de sable sur nous de façon presque délibérée il me semble, tant elle garde son regard fixé sur moi.

Quand le trou paraît la satisfaire, elle se met en position afin d'y déposer ses œufs. Le travail commence. Sa carapace se soulève avec d'infinis efforts et, le regard vide, elle semble entrer dans une sorte de transe. Dans le nid soigneusement préparé, qu'elle a estimé être à la bonne température, à la profondeur idéale, et à la distance parfaite de l'océan, elle dépose alors un par un ses œufs – sa « raison d'être » dans l'évolution, le matériel génétique qui la relie à sa mère, à sa grand-mère, dans une très longue chaîne remontant jusqu'au Crétacé, et aussi d'une certaine manière à sa distante cousine contemporaine : moi. Elle respire bruyamment, et une moiteur accompagnant ses efforts apparaît autour de ses narines. Par-delà le clivage entre mammifère et reptile, je ressens une grande empathie pour cette mère. Autour de nous dans cette vaste pouponnière, d'autres femelles sont en train d'évacuer du sable et de déposer des œufs. Les vautours et les chiens sont déjà à l'affût, prenant leur mal en patience, attendant de pouvoir déterrer et se repaître des œufs fraîchement pondus.

Chaque tortue pond environ 100 œufs, mais parmi les plus de 10 millions déposés lors de l'*arribada*, seuls 0,2% survivront jusqu'à l'éclosion. Parmi ces derniers on estime que 1% seulement

atteindront l'âge adulte. Une partie du problème est liée à l'*arribada* elle-même, laquelle dure environ cinq nuits. Une telle masse de tortues pondant sur une portion de plage si restreinte a pour conséquence que celles qui arrivent les nuits suivantes creusent et endommagent les pontes précédentes provoquant ainsi des infections bactériennes qui détruisent à la fois la ponte initiale et la nouvelle. Et comme la période d'incubation est d'au moins 45 jours mais qu'habituellement les *arribadas* ont lieu à intervalle d'un mois, une tortue qui vient déposer ses œufs peut également endommager la ponte d'une *arribada* précédente.

Les vautours sont déjà en train de festoyer sur les restes d'œufs déchirés et disséminés. Ils sont par eux-mêmes incapables de déterrer les nids, mais les chiens le peuvent. Et là où il y a des hommes, il y a des chiens. Ils constituent une menace tant pour les tortues qui viennent pondre que pour les œufs et les jeunes fraîchement éclos. Jairo les chasse mais ils reviennent aussitôt.

Il me demande si je veux en voir plus encore, ce que bien entendu j'accepte d'un hochement de tête. Il enlève alors soigneusement une des mottes de sable cachant la queue de notre tortue en travail. Au fond de son nid, j'aperçois une poignée d'œufs blancs et brillants de la taille de balles de ping-pong. Sous sa queue pend son ovipositeur charnu qui lui sert à pondre et à déposer ses œufs. Alors que j'observe fascinée, une autre précieuse boule fait son apparition, suivie d'un jet de liquide protecteur clair et visqueux, destiné à enrober l'œuf perméable. Nous regardons tomber quelques œufs encore, puis Jairo replace la protection de sable. Nous reculons nous asseoir.

Les tortues sont admirablement adaptées à leur environnement. Elles ont survécu, presque à l'identique, depuis le Trias il y a plus de 200 millions d'années, et peuvent vivre près d'un siècle à l'état sauvage, parvenant même à se reproduire à un âge avancé. Mais dans cet Anthropocène, cette période dominée par les humains, elles font probablement face à leur plus grand défi depuis plus d'un million d'années. Les plages où elles nidifient ont été perturbées par l'accroissement des populations humaines et canines. Nos éclairages eux-mêmes posent problème, désorientant les tortues et les nouveau-nés qui se fient à la lune pour se repérer. Elles sont tuées ou blessées dans des collisions avec les bateaux, se prennent dans les filets de pêche ou meurent après avoir ingéré des plastiques flottants ou d'autres polluants. La surpêche et la destruction des récifs coralliens menacent leur source de nourriture. Le changement climatique les frappe également – la montée du niveau des mers et l'érosion des plages qui s'ensuit réduit la surface disponible pour les nids au point que certaines plages leur sont désormais inutilisables. Enfin, l'augmentation de la température engendre des changements de sexe préoccupants. Le sexe d'une tortue dépend de la température d'incubation de l'œuf. Les œufs les plus chauds produisent des femelles ; les plus froids des mâles. D'après les biologistes le réchauffement climatique a déjà provoqué un déséquilibre des sexes chez de nombreux reptiles, et les conséquences sont inquiétantes pour l'accouplement et la survie des tortues. Le mois passé, et de façon très inhabituelle, il n'y a pas eu d'*arribada* ici. Le manque de mâles est l'une des raisons évoquées.

Mais la plus grande menace pesant sur les tortues est le braconnage. Dans le monde entier des femelles olivâtres sont

massacrées alors qu'elles sont en train de pondre, pour leur viande, leur peau et leur carapace ; leurs œufs sont également un mets délicat et fort prisé. Au cours des 20 dernières années en une génération à peine, la population globale de tortues a chuté d'un tiers. Le commerce global illégal de la faune sauvage est annuellement estimé à plus de 13 milliards d'euros, constituant une menace tant pour la santé humaine – 70% des maladies infectieuses sont d'origine zoonotique, c'est-à-dire transmises par des animaux vertébrés – que pour la stabilité des gouvernements. Le commerce illégal de la faune est en effet souvent tenu par des réseaux criminels bien organisés qui sapent les efforts des gouvernements visant à mettre un terme à d'autres commerces illégaux comme celui des trafics d'armes et de stupéfiants, et qui participent au financement des conflits régionaux. Les marchands utilisent des euphémismes ou décrivent leurs produits comme des « animaux élevés en captivité » pour les vendre sur des sites comme eBay. Plus de la moitié de l'ensemble de la faune vendue illégalement converge vers la Chine.

Des défenseurs de la nature comme Jairo et quelques gardes officiels patrouillent sur la plage pendant les *arribadas*, mais ils ne font pas le poids face à des braconniers bien déterminés à revendre ensuite ces œufs au marché noir, parfois pour leurs prétendues vertus aphrodisiaques. Sur la côte caribéenne du Costa Rica, j'ai vu des œufs de tortue vendus au grand jour et consommés dans les cafés et les restaurants. La plage de Moín près de Puerto Limón sur la côte est, est celle où nidifient les tortues luth, une espèce particulièrement menacée. Le braconnage y est si intense que de jeunes écologistes, dont beaucoup simples volontaires, se

précipitent après la ponte pour déterrer les œufs et les réenfouir en des endroits plus sûrs et tenus secrets. Les braconniers, pour la plupart liés au trafic de drogue, sont devenus violents au point de menacer et d'attaquer les militants. En mai 2013, un jeune du nom de Jairo Mora a été kidnappé par des braconniers alors qu'il récupérait des œufs pour les cacher, puis assassiné. Personne n'est allé en prison et Mora a rejoint la longue liste de ceux tués pour avoir protégé la nature au Costa Rica comme ailleurs. En 2015, l'année la plus récente pour laquelle on a des statistiques, 185 personnes ont été tuées alors qu'elles protégeaient les ressources naturelles de la planète. Seule une petite fraction de ces meurtres ont donné lieu à des condamnations.

« Es-tu inquiet pour ta propre sécurité, quand tu es ici tout seul la nuit ? » demandé-je à Jairo. « Non, c'est différent dans les Caraïbes » me répond-il. Puis il admet, « Parfois ». Depuis le meurtre de Mora, la plupart des écologistes n'osent plus patrouiller sur la plage de Moín et le braconnage s'y poursuivrait sans entraves. Et pourtant des gens comme Jairo attachent une telle valeur à la faune sauvage qu'ils sont prêts à mettre leur sécurité en danger pour sa préservation.

Il est presque 6 heures du matin ; la nuit a maintenant complètement disparu. Jairo est fatigué mais souriant. La plage qui était jusqu'alors à nous seuls sera bientôt envahie. « Notre » tortue a fini de pondre ses œufs. Elle les recouvre maintenant méticuleusement de sable avant de se remettre poussivement en route vers la grève. Tout comme les autres mères dont chacune a assumé sa part dans la continuation de l'espèce. J'éprouve un sentiment ridicule de propriété sur ce bout de plage après avoir été

témoin de ce sable couvert de tortues, et avoir assisté au soleil levant aux efforts d'une mère pour mettre au monde une nouvelle génération. C'est alors que de l'autre bout de la plage, du côté du village, s'approche une troupe d'une quarantaine de personnes transportant chacune de grands sacs de jute et des paniers.

Nous autres humains avons depuis toujours exploité les ressources de notre environnement que ce soit pour notre nourriture, notre énergie ou pour mille autres besoins. Nous le faisons d'ailleurs si bien que nous vivons plus longtemps, mieux que jamais, et que nous dominons désormais le monde. Par le passé, nos activités ont provoqué quelques extinctions locales, mais nous sommes à présent plus de 7 milliards et nous agissons à une telle échelle que nous menaçons les ressources mêmes dont nous dépendons. Ne sommes-nous donc qu'un banal constituant de cette nature destiné à nous reproduire jusqu'aux limites des capacités et des ressources de l'environnement, avant de connaître un effondrement démographique ? Ou au contraire serons-nous la première espèce capable d'autodétermination, apte à moduler ses besoins et en mesure de gérer le pillage du monde naturel auquel elle se livre, afin qu'il reste habitable à l'avenir ?

Depuis quelques décennies, la communauté établie à Ostional a mis en œuvre un programme unique. Plus précisément une expérience de conservation assez controversée et dont l'objectif est de maintenir une population durable de tortues tout en profitant aux habitants du village, pauvres pour la plupart. Ostional est en effet le seul endroit au monde où la récolte d'œufs de tortue olivâtre est autorisée.

Malena Vega s'approche de moi avec un large sourire illuminant son visage tout en rondeurs. Nous avons parlé deux ou trois fois au téléphone et elle m'a aimablement proposé de participer aux activités de la journée. Elle tourne son regard vers Jairo. Celui-ci lui confirme qu'il y avait bien plus d'un millier de tortues nidifiant sur la plage, soit le nombre minimum pour que la récolte des œufs soit autorisée. D'un geste amical de la main il prend alors congé et retourne à la station de recherche océanographique, le temps d'une sieste avant la reprise de son travail en fin de journée. Un coup de corne retentit, la collecte des œufs peut débuter.

À la fin des années 80, des représentants du village avaient pris contact avec les biologistes qui étudiaient les *arribadas* en vue de réfléchir à une solution permettant de légaliser la récolte d'œufs dans une perspective durable. Ils s'inquiétaient tout particulièrement du nombre considérable de braconniers qui, lors de chaque *arribada*, fondaient sur la plage, volaient les œufs et menaçaient les villageois. Un plan a été mis en place en concertation avec le gouvernement et l'Association pour le développement d'Ostional, autogérée par les femmes. Certaines familles ont alors été autorisées à récolter un nombre limité d'œufs durant les trois premiers jours de l'*arribada* (ces œufs auraient de toute façon été abîmés par les pontes des jours suivants). Dans le cadre de cet accord, la communauté nettoie la plage, protège les tortues et leurs œufs des braconniers, et gère l'énorme afflux de touristes venant à Ostional durant les *arribadas*. Les œufs ainsi récoltés sont autorisés à la vente au même prix que les œufs de poule afin de décourager le marché noir, et les recettes utilisées pour des projets de développement locaux.

Tout autour de moi des hommes et des femmes dansent la tarentelle sur le sable, tapant de leurs pieds nus pour repérer les nids. Chacun revêt sous une forme ou une autre un motif en lien avec les tortues, que ce soit un collier ou une simple chemisette imprimée. L'un après l'autre ils se baissent et creusent. Très peu de tortues se trouvent alors encore sur la plage, la prochaine vague attendant la tombée de la nuit pour toucher terre. Malena est accroupie non loin de moi, ses mains s'agitant en rythme dans le sable pour dégager la couche plus dense du dessous. Mais j'ai soudain le cœur arraché. Je comprends que c'est *son* nid, celui que j'ai vu si précautionneusement préparé, rempli et recouvert il y a quelques heures à peine.

« Viens ici » me lance Malena. Je la rejoins. Elle me prend la main et la plonge dans le trou. « Tu les sens ? » me demande-t-elle. Je tâtonne un instant et suis soulagée de ne sentir autre chose que du sable. Malena introduit sa main une nouvelle fois et ramène adroitement quelques œufs qu'elle fourre dans son sac. « Essaie encore » me dit-elle.

Cette fois, imitant Malena, je replie ma main en forme d'écope et devine les œufs. J'en retire un. Malena m'applaudit. Elle plonge alors sa main plusieurs fois dans le trou et en extrait des poignées entières. Elle vide le nid et le rebouche avant de se déplacer de quelques mètres et de recommencer avec un autre. Je reste assise, l'œuf dans la main. Il est doux et chaud avec une consistance ressemblant à celle du cuir, et une texture granuleuse. Je me sens devenue la voleuse de mes cauchemars, celle qui pille la pouponnière à peine la mère disparue. L'exact opposé de la culture écoresponsable dans laquelle j'ai été élevée. Voler des œufs est

déjà condamnable en soit, mais voler les œufs d'une espèce en danger est impardonnable.

« Tu peux le manger cru comme ça ! » me dit Malena qui, joignant le geste à la parole, déchire l'enveloppe d'un coup de dent et gobe d'un coup son contenu. Autour de moi, les sacs se sont remplis d'œufs. Il fait déjà chaud sur le sable noir et chacun a maintenant hâte de rentrer se mettre à l'ombre au village. J'aide Malena à nouer son sac et ensemble nous progressons péniblement sur le sable jusqu'à sa maison. En chemin, entrecoupé de pauses fréquentes en raison du poids étonnamment lourd des œufs de tortues, Malena, qui est la présidente de l'Association pour le Développement d'Ostional, m'explique comment le projet a changé la vie de la communauté. Ostional est un village pauvre et rural coincé entre deux rivières, les montagnes et l'océan. Durant la saison des pluies, quand les rivières débordent, le village est coupé du monde et doit survivre avec les réserves de nourriture à disposition. Beaucoup d'habitants ont quitté Ostional pour la ville afin de trouver du travail. Mais désormais la vente légale d'œufs de tortues permet aux locaux de gagner leur vie. Ces œufs paient les formations, les congés maternité et les retraites. Les gens reviennent vivre au village. « Les tortues sont notre manne » me dit Malena. « Nous les adorons. Elles sont tout pour nous. »

« Mais n'est-ce pas simplement la légalisation du braconnage que vous pratiquiez auparavant ? » lui demandé-je. « Avant, c'était dangereux ici », me répond-elle. « La plage était sale et c'était un vrai repère de braconniers. La police venait, il y avait des bagarres à l'arme à feu. Un jour, ma grand-mère a reçu une balle perdue et elle en est morte. Après, on s'est juré : plus jamais ça ! C'est notre

village, ce sont nos tortues. » Je suis frappée par la détermination incroyable de cette femme aujourd'hui elle-même grand-mère, et par ce qu'elle et son groupe de voisines ont réussi à faire.

Nous avons plus que jamais besoin des ressources de la planète pour accompagner le développement des pays pauvres, mais aussi et tout simplement pour nourrir notre population toujours plus importante. Mais nous devons trouver les moyens d'une exploitation *durable*. Ce que Malena et ses voisines expérimentent à Ostional l'est également actuellement dans d'autres endroits du monde comme les forêts tropicales avec le bois ou les océans avec le poisson. Il est encore trop tôt pour savoir si nous sommes réellement capables de restreindre les prélèvements de ces ressources naturelles menacées jusqu'à des niveaux qui les rendraient pérennes. Mais les premiers signes montrent que, là où les besoins à long terme des communautés locales sont pris en compte, les écosystèmes sont mieux gérés.

Nous arrivons enfin à la maison de Malena, une simple construction en bois de plain-pied subdivisée par des cloisons où elle vit avec sa fille, sa petite-fille et quelques poulets. « Tu dois goûter une tortilla » me dit-elle avec un sourire avant de m'en lister tous les bienfaits pour la santé. Tandis qu'elle met une poêle sur le feu, hache de la coriandre et des oignons, et bat dans un bol des œufs de tortue fraîchement ramassés, je songe à la façon étrange et aléatoire dont nous attribuons de la valeur aux êtres vivants au point parfois d'y laisser notre vie. Beaucoup d'écologistes pensent que la récolte légale des œufs à Ostional a contribué au meurtre de Jairo Mora en garantissant un marché pour les œufs de tortue. Ce que je constate pour ma part, c'est que ce marché est non seulement

bon pour l'économie locale, mais également pour les tortues, qui bénéficient ainsi d'une plus grande protection.

Dans ce nouvel âge de l'humanité, nous ne pouvons laisser la nature se débrouiller seule face à nos assauts, au risque qu'il ne subsiste plus à la fin que des mauvaises herbes. Si nous voulons continuer à voir des animaux sauvages, nous devons activement les protéger. Bien sûr les tortues n'ont pas beaucoup d'utilité pour nous. Mais je n'aimerais pas vivre dans un monde où elles auraient disparu. Alors que nous essayons de trouver un compromis entre les exigences de l'homme et celles de la nature, Ostional nous montre que la victoire de l'un ne signifie pas nécessairement la défaite de l'autre. Et que pour protéger la vie sauvage il faut aussi protéger la vie des hommes.

L'omelette de tortue était délicieuse.

3 Changement climatique

Julia Slingo

Le changement climatique sera l'un des défis majeurs du 21^e siècle. La façon dont nous l'affronterons sera déterminante pour notre prospérité, notre santé et notre bien-être, ainsi que pour la pérennité de notre environnement. En 2015 plus de 190 nations se sont accordées pour limiter l'augmentation de la température terrestre à moins de deux degrés voire, si possible, à moins de 1,5 degré. Les générations futures regarderont peut-être 2015 comme un tournant dans la volonté de mener à bien une politique en adéquation avec les données scientifiques les plus récentes. Mais dans l'immédiat, comment envisager cette perspective pour le moins angoissante et dont dépendra nos modes de vies futurs ?

Commençons par ces deux mots : *climat* et *changement*. La notion de « climat » se réfère aux *moyennes* sur une longue période (au minimum une trentaine d'années) de variables météorologiques comme le vent, la température ou la pluviométrie. Ces moyennes sont considérées comme stables, c'est-à-dire que l'on s'attend à ce que leurs valeurs demeurent similaires saison après saison et année après année. Beaucoup de sociétés et d'économies dépendent de cette régularité climatique. En Inde par exemple le retour saisonnier de la mousson est essentiel pour assurer l'accès à l'eau, à la nourriture et à l'énergie à tel point que le moindre retard ou la plus infime perturbation peut engendrer des conséquences dramatiques sur l'économie à l'échelle de l'ensemble du pays. Rappelons ici le

célèbre dicton (souvent attribué à Mark Twain mais plus vraisemblablement le fait d'Andrew John Herbertson, géographe britannique et professeur à Oxford) : « Le climat est ce que vous espérez, la météo est ce que vous obtenez ». Ces mots indiquent que lorsque nous nous référons au climat il faut prendre en compte la *fourchette* des météos possibles et en particulier les valeurs extrêmes, leur probabilité et leurs conséquences. La fréquence accrue de ces phénomènes météorologiques violents – ouragans, inondations, incendies, tempêtes et vagues de chaleur – sera en effet une des principales conséquences du changement climatique.

Le mot « changement » implique que quelque chose diffère de la norme. Mais comment définir la norme ? La météo et le climat changent en permanence à des échelles temporelles variables allant de l'heure à la décennie. Ces fluctuations sont constitutives de ce qui définit le climat. Une des façons de repérer un changement est lorsque les valeurs que l'on observe sortent de la fourchette à laquelle nous sommes habitués. C'est par ce type d'observations que les scientifiques sont arrivés à la conclusion qu'un changement climatique est actuellement en cours.

Certes les observations du passé nous montrent que le climat terrestre a toujours changé, par exemple au cours du dernier million d'années, passant alternativement de périodes glaciaires à d'autres plus douces. Et si on remonte plus loin encore, on sait que la Terre était beaucoup plus chaude et le dioxyde de carbone plus abondant qu'aujourd'hui. Alors, pourquoi s'inquiéter ?

Le changement que nous vivons diffère des précédents pour trois raisons. La première est celle de l'*origine du changement*. Notre climat se modifie parce que les concentrations de gaz à effet de

serre dans l'atmosphère, en particulier de dioxyde de carbone (CO_2), augmentent, et ce rapidement. Pour satisfaire les besoins voraces en énergie de nos industries et de nos modes de vie, nous exploitons du carbone fossile fixé depuis des millions d'années dans le charbon, le pétrole et le gaz, et que nous relâchons dans l'atmosphère durant la combustion. Dans le même temps, nous modifions la façon dont la biosphère terrestre recapture le carbone – un processus naturel qui contribue à réduire les effets de nos émissions – en abattant des forêts et en acidifiant les océans. Le processus d'émission de CO_2 dans l'atmosphère est ainsi accéléré. Il entraîne une élévation de la température qui engendre les conséquences sur le climat et l'environnement que l'on connaît comme les vagues de chaleur, de sécheresses et d'inondations, et la fonte des glaciers et de la banquise. L'étude des changements climatiques passés a montré que l'on pouvait les attribuer à de très lentes déviations de l'orbite terrestre autour du Soleil. Celles-ci ont entraîné une modification de la température de la Terre qui, à son tour, a provoqué une réaction des écosystèmes impliqués dans la teneur en CO_2 de l'atmosphère. Le changement climatique actuel a donc de toutes autres causes que celles que la Terre a connues par le passé.

La seconde différence tient à la *vitesse du changement* climatique. Les niveaux de dioxyde de carbone sont actuellement plus de 30% au-dessus de ce qu'ils étaient il y a seulement 100 ans – en fait ils sont 30% plus élevés que ce que la Terre a connu depuis au moins 800 000 ans. La température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'un degré au cours du siècle passé et cette variation pourrait atteindre deux degrés ou plus en 2050 si nous ne

prenons pas des mesures adéquates. Ces chiffres peuvent paraître insignifiants, mais il faut les mettre en regard de la variation de cinq degrés qui a suffi à mettre fin à la dernière période glaciaire ! En relâchant aussi rapidement le carbone fossile dans l'atmosphère, nous dérégions certaines des boucles rétroactives naturelles qui permettent aux écosystèmes de s'adapter aux périodes de transition climatique. La disparition de nombreux habitats naturels en est l'illustration, tout comme la modification des saisons qui affecte le cycle de vie de nombreuses espèces. Pour beaucoup de plantes et d'animaux, la vitesse du changement climatique est trop rapide pour leur permettre de migrer ou de s'adapter. Il est donc vraisemblable que le bouleversement de notre climat aura des conséquences dramatiques sur de nombreux écosystèmes dans les prochaines décennies. Parallèlement, nous pillons des réserves d'eau millénaires et puisons dans nos fleuves des volumes tels qu'ils n'ont parfois plus assez d'eau pour atteindre la mer. En d'autres termes, nous bouleversons les grands cycles de notre planète, ceux de l'eau et du carbone, et entraînons ainsi la Terre vers l'inconnu.

La troisième différence est l'*échelle* à laquelle s'opère le changement climatique actuel. La population de notre planète s'accroît, la taille de nos villes augmente, principalement le long des côtes, et notre monde est de plus en plus interdépendant et complexe, organisé selon des réseaux de télécommunications globaux, des systèmes de transports efficaces et des approvisionnements permanents en énergie, en nourriture et en eau. Tous ces systèmes sont intrinsèquement vulnérables à des météos et des climats inhabituels. La pression exercée par le changement climatique est un nouveau paradigme qui soulève de sérieuses

interrogations quant à notre sécurité future. Plus que jamais auparavant, l'évolution du climat mondial laisse entrevoir que celui-ci aura des conséquences directes et indirectes considérables sur nos vies, nos biens, notre bien-être et notre prospérité.

Nous avons donc toutes les raisons de nous inquiéter et peu de temps pour agir. Il y a près de 30 ans, en 1990, la Première ministre britannique Margaret Thatcher reconnaissait déjà la menace posée par le changement climatique :

« Nous pouvons dire que nous avons maintenant le rapport du géomètre, qui montre qu'il y a des défauts et que des travaux de réparation doivent être entrepris rapidement... Nous ferions courir un risque grave aux générations futures si, ayant été alertés à temps, nous ne faisons rien ou nous contentions de nous dire : Bah, ces problèmes arriveront après notre mort ! Ces problèmes n'arriveront pas après notre mort. Ils sont là, maintenant, et ce sont nos enfants et petits-enfants, qui sont en train de grandir, qui en subiront les conséquences. »

Rien, et certainement pas l'accumulation de preuves scientifiques, n'atténue aujourd'hui l'urgence de ce message. Nous continuons pourtant de jouer aux dés avec l'avenir du monde.

Ce que nous savons et ce que nous ne savons pas

Les températures ont augmenté d'un degré depuis l'ère préindustrielle ; la taille de la banquise arctique en été a diminué

d'environ 40% depuis les premières mesures en 1979 ; le niveau des mers s'élève de trois millimètres *chaque année* depuis 30 ans ; un nouveau record de température est établi chaque décennie depuis 1850. Il est désormais certain que l'humanité est la « cause principale » de l'augmentation des températures depuis le milieu du siècle dernier (5^e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2013).

Bien que l'incertitude revête une dimension importante dans les projections climatiques, certaines d'entre-elles sont incontestables. Nous savons par exemple que la Terre va continuer à se réchauffer ; nous savons que les effets les plus extrêmes du changement climatique croissent avec la température et que le risque de changements irréversibles et désastreux augmente ; nous savons également que le niveau des mers continuera à s'élever longtemps après que nous aurons stabilisé la température à la surface de la Terre, et que la fonte des calottes glaciaires et des glaciers se poursuivra.

En raison de tout le CO₂ aujourd'hui accumulé dans l'atmosphère, nous sommes convaincus que certaines modifications du climat sont désormais irréversibles, quelle que soit l'évolution future de nos émissions carbonées. Ceci implique que des adaptations sont d'ores et déjà nécessaires. L'échelle des investissements potentiels, par exemple pour se protéger des inondations ou des cyclones, doit désormais intégrer la façon dont le climat évoluera au cours des deux ou trois prochaines décennies. Nous devons planifier dès à présent la manière dont nous protégerons nos vies, nos villes, nos villages et notre environnement naturel des aléas climatiques.

Le climat de notre planète est extraordinairement complexe ; plus nous l'observons et essayons d'en faire des simulations, plus nous en apprenons sur la multitude d'interactions qui en déterminent l'évolution. Nous avons découvert que les océans, en raison de leur capacité gigantesque à absorber la chaleur, influencent fondamentalement la manière dont le changement climatique se manifestera tant globalement que régionalement ; nous connaissons également la réaction de la biosphère terrestre – plantes et sols – face au réchauffement et à l'évolution des régimes pluviométriques : moins d'absorption de CO₂ et donc plus encore d'effet de serre. Par ailleurs et comme nous l'apprend la physique la plus élémentaire, plus l'air est chaud, plus il peut emmagasiner de vapeur d'eau. Nous devons donc nous attendre à davantage de pluies diluviennes et d'inondations. Il y a lieu de s'inquiéter car en dépit de toutes ces découvertes aucun mécanisme naturel susceptible d'atténuer les conséquences de nos émissions de gaz à effet de serre n'a encore été identifié ; au contraire, plus nos connaissances progressent, plus nous devons nous rendre à l'évidence : le défi est plus difficile à relever qu'initialement prévu.

Ces dernières années ont vu de remarquables progrès s'accomplir dans l'élaboration d'une nouvelle génération de modèles climatiques. Ceux-ci intègrent dans les simulations un nombre croissant de variables qui permettent de s'approcher plus encore du système naturel complexe que constitue la Terre. Ces recherches sont vitales car l'observation seule ne nous permet pas de comprendre comment le système terrestre évolue, ni comment il s'est développé jusqu'à présent. Or, être en mesure d'évaluer les

risques et les dangers sera crucial pour décider de l'urgence et de l'ampleur des actions à mettre en œuvre.

En 2015 la température à la surface de la Terre a franchi le seuil d'un degré d'augmentation, soit déjà la moitié de la limite de deux degrés fixée par l'Accord de Paris. Simultanément, nous avons consommé les deux tiers du budget d'émissions carbone pour demeurer dans cette même limite. De nouveaux résultats montrent qu'il s'agit d'ailleurs d'un budget optimiste ; les effets de la fonte du permafrost et les limites de la biosphère pour résorber une partie de nos émissions de carbone laissent penser que nous avons encore moins de marge de manœuvre qu'initialement prévu. Tant qu'à parier sur l'avenir de notre planète, nous serions donc bien avisés d'être prudents car les chances sont largement en faveur d'un changement climatique au minimum inconfortable et au pire dangereux. L'absence de certitudes ne doit pas justifier l'inaction.

Notre climat en 2050

À l'échelle de l'évolution climatique, 2050 c'est demain. Nous avons donc une idée assez précise de ce à quoi ressemblera le climat mondial d'ici trois décennies. Sans lister tous les faits et chiffres, je vais souligner quelques conséquences pour l'humanité d'un monde où nous n'aurions pas réussi à réduire substantiellement nos émissions de gaz à effet de serre.

Appuyons donc sur la touche « avance rapide » jusqu'en 2050. La température moyenne à la surface de la Terre a alors franchi la barre des deux degrés au-dessus de ce qu'elle était il y a tout juste un siècle, et le niveau moyen des mers s'est élevé de près de 30

centimètres durant la même période. L'Arctique est désormais entièrement dénué de glaces durant la période estivale et la température de l'océan a considérablement augmenté. Les populations de mammifères marins, de poissons et d'oiseaux se modifient, et les indigènes du Grand Nord tels que les Eskimos et les Lapons sont menacés par l'insécurité alimentaire. La disparition des glaces côtières, l'élévation du niveau des eaux et les intempéries de plus en plus intenses forcent des communautés entières à se déplacer. Le commerce international profite de l'ouverture de l'Arctique pour en faire une des routes maritimes les plus prisées et l'exploitation des ressources naturelles de l'Arctique va bon train. Globalement, de nouvelles espèces invasives ont profité de l'accroissement de l'activité humaine pour modifier certains écosystèmes.

En Inde, la chaleur précédant la mousson est maintenant handicapante pour une large partie de la population, particulièrement dans la grande plaine septentrionale ; les inondations durant la mousson sont de plus en plus importantes en raison des pluies torrentielles qui s'abattent quotidiennement. Les habitants des régions côtières proches du niveau de la mer voient fréquemment l'océan monter et entrer dans les terres durant les tempêtes. Ce phénomène affecte les ressources en eau douce, dégrade les terres arables et s'accompagne d'une augmentation des infections causées par les eaux contaminées. La migration forcée devient la seule solution pour une part grandissante de la population. Une note positive malgré tout : la qualité de l'air s'est améliorée dans l'intervalle et moins de gens souffrent de maladies respiratoires.

Dans les régions tropicales, la construction et la maintenance des infrastructures des villes et des bourgades devient de plus en plus difficile en raison de températures diurnes qui dépassent souvent le seuil au-delà duquel il est dangereux de travailler en plein air. La consommation énergétique liée à l'air conditionné accroît considérablement les besoins en électricité.

Plusieurs petits États insulaires du Pacifique comme les Kiribati sont désormais inhabitables en raison de la montée des eaux. Leurs populations n'ont plus de terres et leur avenir s'annonce plus qu'incertain. Ailleurs, le blanchiment des coraux a tué la pêche durable dont dépendaient les habitants pour leur sécurité alimentaire. Le tourisme, qui représentait une part importante des économies locales, s'est écroulé.

En 2050, l'Australie du Sud, le bassin Méditerranéen et le Moyen-Orient sont en proie à des sécheresses prolongées et à des périodes de chaleur estivale intenses. Les incendies de forêts sont de plus en plus dangereux, menaçant les habitations et les environnements urbains, et endommageant les écosystèmes naturels. La question de l'approvisionnement en eau se pose désormais de manière aiguë, alors que les nappes d'eau souterraines se vident.

Au Royaume-Uni et en Europe du Nord, la météo est de plus en plus volatile et présente des températures et des précipitations extrêmes de plus en plus fréquentes. Cette région du monde a massivement investi dans des digues et a su aménager son environnement pour limiter certains effets du changement climatique. Les vagues de chaleur estivales sont devenues habituelles et la saison de ski plus qu'incertaine en raison de la fonte

de la couverture neigeuse. La période d'exploitation agricole s'est allongée et les températures plus chaudes permettent de diversifier tant la production alimentaire que l'offre touristique.

Cet aperçu des conditions climatiques en 2050 constitue une sévère mise en garde : le changement climatique est un déterminant fondamental de notre avenir et il est de notre responsabilité de préserver la diversité des écosystèmes terrestres. Il est probable que l'eau deviendra sous peu le bien le plus précieux sur la planète. Comprendre comment les régimes pluviométriques régionaux évolueront et quelles seront les conséquences de ces changements sur la disponibilité et la qualité des ressources en eau constitueront des questions centrales. Tout comme anticiper les conflits à venir, par exemple quant aux droits respectifs de chaque pays à accéder à des ressources aquifères lorsque celles-ci traversent ou se trouvent à cheval sur plusieurs États.

Jusqu'à présent, le débat sur le changement climatique était largement dominé par l'incertitude des projections et par les questions de son impact économique. Mais le réchauffement climatique va également poser des questions morales. Ce sont en effet les régions les plus pauvres qui en subiront les conséquences les plus dramatiques, et le changement climatique entravera plus encore leur développement socio-économique. Comme l'a rappelé Flavia Pansieri, la Haut-Commissaire adjointe aux droits de l'homme des Nations Unies, en 2015, « Le changement climatique provoqué par l'homme n'est pas uniquement une agression sur l'écosystème que nous partageons. Il sape aussi le droit à la santé, à la nourriture, à l'eau et aux équipements sanitaires, à un logement décent, et – pour les peuples des petits États insulaires et les communautés

côtières – le droit à l'autodétermination ». À l'avenir, la protection des droits élémentaires des individus et le rôle des États développés dans le soutien aux États en développement influenceront profondément les débats sur les moyens à mettre en œuvre pour faire face au changement climatique.

Nos choix

2015 a marqué un tournant symbolique : non seulement le monde a ratifié l'Accord de Paris, mais il a également souscrit au Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe. Dans ce texte, les nations s'engagent à réduire les pertes en vies humaines, à freiner la destruction des moyens de subsistance et à combattre les menaces sanitaires consécutives aux catastrophes naturelles. Les pays signataires se sont également accordés sur des objectifs de développement durable pour mettre fin à la pauvreté et la faim, à améliorer la santé et l'éducation, à rendre les villes plus durables, et à protéger les océans et les forêts. Pour atteindre chacun de ces objectifs, combattre le changement climatique sera fondamental.

Il est illusoire de s'attaquer au réchauffement global sans une prise de conscience préalable, à savoir que nos modes de vie doivent changer. Nous devons transformer la façon dont nous produisons, stockons et utilisons l'énergie. Et nous devons apprendre à gérer des météo et des climats plus extrêmes. L'une des clés sera l'anticipation. Les progrès continus des prévisions météorologiques et climatiques nous aideront à être plus efficaces selon le principe qu'un homme averti en vaut deux. Nos actions

auront un impact sur l'environnement, mais aussi sur la manière dont les phénomènes météorologiques et climatiques nous affecteront. Il nous faut donc progresser dans l'évaluation globale des risques liés au changement climatique, depuis les dégâts causés par une inondation par exemple, jusqu'aux actions spécifiques à mettre en œuvre pour minimiser les risques comme la mise en place de systèmes de drainage ou la plantation d'arbres, en passant par l'évaluation des ratios coût/bénéfice. Ceci nécessitera des simulations météorologiques et climatiques reposant sur des modélisations fines des systèmes écologiques et bâtis, une meilleure compréhension des dynamiques humaines, ainsi que de nouvelles approches permettant d'analyser les facteurs financiers et socio-économiques.

Jusqu'à présent, la lutte contre le changement climatique s'est focalisée sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone. Pourtant il existe d'autres polluants atmosphériques comme le noir de carbone ou les aérosols soufrés. Une diminution de leurs émissions serait bien entendu bénéfique pour la qualité de l'air et la santé végétale, animale et humaine. En Chine par exemple, la qualité de l'air est si problématique qu'elle pousse le pays à évoluer vers une économie faiblement carbonée. La situation n'est toutefois pas si simple car certains polluants atmosphériques contribuent à refroidir la planète et leur élimination pourrait brièvement accélérer le réchauffement dans certaines parties du monde. Trouver la meilleure voie pour réduire nos émissions et freiner le changement climatique est donc une entreprise des plus complexe. Elle devra intégrer tant les dernières données relatives au système Terre que celles issues d'évaluations socio-économiques.

Un autre facteur à ajouter au débat est le rôle que pourraient jouer les technologies de géo-ingénierie. Celles-ci consistent en une intervention à grande échelle sur les systèmes naturels terrestres, par exemple en contrôlant le rayonnement solaire ou en éliminant directement le CO₂ de l'atmosphère à l'aide du captage et stockage du carbone (CSC) à partir de bioénergies. Mais pour avoir un effet significatif et ainsi atteindre les objectifs de température fixés par l'Accord de Paris, ces techniques devront être mises en œuvre globalement sur toute la planète.

Concernant la régulation du rayonnement solaire, en modifiant par exemple les nuages avec des particules fines pour les rendre plus réfléchissants, ou en injectant des aérosols dans la stratosphère pour renvoyer plus de rayons du soleil vers l'espace, une étude d'impact préalable sera nécessaire. La mise en place de telles mesures demandera une prise en compte de l'ensemble des paramètres, au-delà même des effets sur la température globale, non seulement afin d'anticiper les conséquences régionales sur le climat mais aussi sur la sécurité alimentaire et la qualité de l'eau. Des recherches préalables doivent donc être menées avec la même rigueur scientifique que pour l'étude des conséquences régionales des gaz à effet de serre. Les aspects sociétaux, légaux et politiques de ces pratiques doivent également être anticipés car ces technologies pourraient être mises en œuvre unilatéralement par certains États, sans considération de leur impact global. Des mécanismes de gouvernance internationale sont donc nécessaires.

En définitive, quelle que soit la voie que nous suivrons, combinant adaptation aux effets du changement climatique et atténuation de ses conséquences, il incombera aux scientifiques de

proposer des solutions innovantes aux problèmes de production, de stockage et de distribution d'énergie propre, et ceci en l'espace de quelques décennies seulement tout en bouleversant le moins possible l'économie globale. Dans le même temps, nous devons trouver à notre échelle individuelle les moyens de protéger l'environnement et nous assurer que nous exerçons de manière responsable notre rôle de gardiens de la vie sur Terre pour les générations futures. Ceci implique que nous devons faire des choix de vie fondamentaux tout en aidant ceux qui n'en ont pas la possibilité.

Pour finir

Il ne fait aucun doute que le changement climatique nous affectera profondément à l'avenir, mais il faut rappeler que nous n'entrons pas aveuglément dans ces temps à venir. L'élaboration de modèles numériques simulant le climat terrestre et permettant d'anticiper l'évolution de la météo et du climat à partir des lois fondamentales de la physique est l'un des progrès scientifiques majeurs des 50 dernières années. Peu d'autres disciplines scientifiques regardent l'avenir avec la même confiance que celle aujourd'hui atteinte par les prédictions climatiques.

Rappelons-nous les mots du vice-amiral Robert Fitzroy, commandant du *Beagle*, qui a embarqué Charles Darwin dans son voyage historique autour du monde. Il a été le fondateur de l'Office météorologique du Royaume-Uni et a établi les premières prévisions météorologiques. Après la perte du *Royal Charter* dans une terrible tempête en 1859, il écrit au journal *The Times* : « L'homme ne peut

calmer la furie du vent, mais il peut la prédire. Il ne peut apaiser la tempête, mais il peut fuir sa violence, et si tous les outils disponibles pour sauver des vies lors d'un naufrage étaient correctement employés, les effets de cet affreux malheur pourraient être merveilleusement adoucis ».

Il y a plus de 150 ans, Fitzroy s'est aventuré dans la production de bulletins météo afin d'atténuer les conséquences des intempéries. C'est également grâce aux prévisions que nous serons en mesure d'affronter le changement climatique. Du local au global, de l'heure à la décennie, notre compréhension de la météo et du climat ainsi que nos prédictions nous permettent de prévoir l'avenir et de nous protéger de ses aléas.

Mais laissons le dernier mot à l'astronaute et climatologue britannique Piers Sellers, décédé d'un cancer du pancréas en décembre 2016. Apprenant son diagnostic, il a écrit un article émouvant dans le *New York Times* livrant sa vision du changement climatique :

« Les nouvelles technologies améliorent nos vies sans que nous ne soyons en mesure de l'anticiper. Il n'y a aucune raison valable et démontrée de croire que notre avenir sera pire que notre présent si nous nous efforçons de gérer soigneusement les problèmes et les risques qui se posent. L'histoire est pleine d'exemples où nous, êtres humains, nous sommes tirés de passes difficiles. Les gagnants tendaient à être réalistes, pragmatiques et flexibles ; les perdants étaient souvent dans le déni de la menace... En tant qu'astronaute, j'ai marché dans l'espace à 350 kilomètres au-dessus de la Terre. Flottant relié par un cordon à la Station spatiale internationale, j'ai regardé les

ouragans se déplacer comme des toupies à travers les océans, l'Amazone serpenter jusqu'à la mer à travers un tapis vert et brillant de forêts, et de gigantesques orages nocturnes zébrés d'éclairs éclater sur des centaines de kilomètres le long de l'Équateur. Depuis ce promontoire divin j'ai pu observer comment la Terre était fragile et infiniment précieuse. Je suis plein d'espoir pour son avenir. »

L'AVENIR DE L'HUMAIN

Médecine, génétique
et transhumanisme

4 L'avenir de la médecine

Adam Kucharski

Le 26 avril 2016, une menace nouvelle et microscopique a fait son apparition en Pennsylvanie, aux États-Unis. Alors que l'attention du pays était ce jour-là toute entière tournée vers la primaire présidentielle, une femme s'est présentée à l'hôpital avec les symptômes typiques d'une infection bactérienne. Les docteurs ont prélevé un échantillon d'urine et les tests ont montré que la bactérie *Escherichia coli* était à l'origine de l'infection. Mais après une analyse en laboratoire plus approfondie, il est apparu que la souche d'*Escherichia coli* n'était pas ordinaire.

Inquiet de l'augmentation des cas de résistance aux traitements, ce laboratoire avait commencé à tester la résistance d'échantillons à un antibiotique appelé colistine. Découverte en 1949, la colistine est ce que l'on appelle un médicament de dernier recours. On ne l'administre que rarement, en raison du risque qu'il présente pour les reins des patients, et uniquement dans le cas d'infections bactériennes résistantes aux antibiotiques habituels. Mais l'échantillon de Pennsylvanie était atypique : il présentait un gène permettant à la bactérie *Escherichia coli* de résister à la colistine. Les organismes de santé publique avaient déjà repéré ce gène ailleurs dans le monde, mais c'était la première fois qu'on le rencontrait aux États-Unis. Par chance, l'échantillon de Pennsylvanie n'était pas résistant à tous les antibiotiques. Il a toutefois montré que de telles infections pouvaient traverser les lignes de défense du

système de santé. « Fondamentalement, ceci nous montre que la fin des antibiotiques est pour bientôt » a déclaré Tom Frieden, alors directeur des Centres de contrôle et de prévention des maladies aux États-Unis.

Cinquante ans plus tôt, une telle déclaration aurait semblé absurde. Les années 1960 étaient une période d'optimisme. Les antibiotiques comme la pénicilline étaient utilisés à large échelle et avec succès depuis près d'une décennie. Albert Sabin avait mis au point un vaccin contre la poliomyélite que l'on pouvait administrer via un morceau de sucre. Des maladies comme la tuberculose étaient enfin devenues curables. En 1967, l'épidémiologiste américain William Stewart avait même annoncé que « la guerre contre les maladies infectieuses avait été remportée ».

Pourtant cette guerre fait toujours rage aujourd'hui. En dépit d'intenses campagnes de vaccination, la poliomyélite n'est pas définitivement éradiquée. De « super-bactéries » résistantes aux traitements rendent la pénicilline inefficace et la tuberculose à nouveau mortelle. Nous sommes confrontés au spectre d'une nouvelle pandémie – peut-être la grippe ou autre – et aux défis sanitaires inhérents à une population vieillissante. D'un autre côté, nous assistons à des progrès remarquables en médecine, depuis la génétique et les traitements personnalisés jusqu'à la médecine régénérative et aux interventions chirurgicales à distance. Alors où en sommes-nous ? Y a-t-il lieu d'être optimiste ou pessimiste ? À quoi ressemblera la médecine du futur ?

La prochaine épidémie

En médecine, on n'est jamais à l'abri de surprises. Sir William Osler a été l'un des pionniers de la formation médicale moderne au début du 20^e siècle. Il décrivait sa discipline comme « l'art du probable et la science de l'incertain ». Prenons par exemple les maladies infectieuses. Il est probable que nous connaîtrons une nouvelle pandémie virale majeure de notre vivant. Mais de là à prévoir où, quand et de quel virus il s'agira, impossible de le savoir.

Osler lui-même est mort en 1919, emporté par la terrible « grippe espagnole » qui a causé plus de victimes que la Première Guerre mondiale. Le 21^e siècle a déjà connu plusieurs menaces virales nouvelles, dont le SRAS en 2003, la grippe A/H1N1p (connue aussi sous le nom de « grippe porcine ») en 2009 et Ebola en 2014. Bien que sérieuses, toutes trois comportaient des caractéristiques biologiques qui ont joué en notre faveur. Les patients souffrant du SRAS ou d'Ebola présentaient des symptômes caractéristiques lorsqu'ils étaient contagieux, permettant aux organismes sanitaires de retracer les personnes qu'ils avaient côtoyées pour les mettre en quarantaine, de sorte à contrôler le développement de l'épidémie. La grippe déjoue ce type de contrôle ; par chance la souche de 2009 a été beaucoup moins mortelle que sa variante dévastatrice de 1919.

Le facteur chance est important car, lors de l'apparition d'une nouvelle épidémie, nous manquons généralement de médicaments et de vaccins efficaces. Le problème est celui de l'échelle de temps : la mise au point de remèdes demande souvent des années ou des décennies, alors que les épidémies se répandent en quelques mois. Raison pour laquelle il n'existe toujours aucun vaccin contre le SRAS et pourquoi le vaccin contre la grippe porcine n'est arrivé qu'en 2009, bien après le pic de l'épidémie. Mais les choses sont en

train de changer. Durant l'épidémie d'Ebola de 2014-2015, les chercheurs ont accéléré la mise au point d'un traitement. En moins d'un an, un essai clinique piloté par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a identifié un vaccin contre le virus. La prochaine étape sera de faire en sorte que la recherche soit prête à débiter dès qu'une nouvelle infection aura fait son apparition. Ce qui signifie avoir à disposition des stocks de médicaments et de vaccins préalablement testés quant à leur innocuité, et des équipes de recherche immédiatement disponibles pour procéder à des essais cliniques dans des conditions de développement épidémique difficiles. En 2017, un collectif de fondations gouvernementales et biomédicales a lancé la *Coalition pour les innovations en matière de préparation aux épidémies* afin de répondre à ce besoin. Elle s'est fixée pour objectif de financer à hauteur d'un milliard de dollars le développement de vaccins et se concentrera tout d'abord sur trois maladies : le coronavirus du syndrome respiratoire du Moyen-Orient (MERS-CoV), la fièvre de Lassa et le virus Nipah. Ces trois virus sont transmis à l'homme par des animaux infectés, mais n'ont pas causé d'épidémie majeure – pour l'instant.

Pour autant, et même si nous avons à disposition les vaccins permettant de faire face immédiatement à une nouvelle épidémie, il nous faudra également être en mesure de détecter où et quand elle apparaîtra. En cela, nos succès – ou nos échecs – dépendront principalement de la façon dont nous collecterons et analyserons les données. En plus des tests d'infection, nous sommes aujourd'hui en capacité de collecter et de comparer les séquences génomiques de virus ou de bactéries prélevés sur les patients. Au début de la flambée d'Ebola en 2014, ce processus prenait des semaines. À la

fin de l'épidémie, les équipes présentes sur le terrain pouvaient séquencer les virus en quelques heures seulement grâce à un appareil de la taille d'une clé USB. D'Ebola à la grippe, il est vraisemblable que chaque infection sera ainsi systématiquement séquencée afin de comprendre la façon dont les différents agents pathogènes se répandent et évoluent. Ces données sont essentielles si nous voulons repérer les mutations qui neutralisent l'action des médicaments ou des vaccins.

Les infections résistantes aux traitements seront sans doute l'un des sujets de préoccupation majeurs de la médecine de demain. L'utilisation massive d'antibiotiques chez les êtres humains et les animaux d'élevage pose le risque d'apparition de maladies bactériennes infectieuses résistantes à tout traitement. Cette situation rendra alors très problématiques des interventions aussi ordinaires que les césariennes ou les opérations de la hanche. L'enjeu n'est pas uniquement celui de la découverte de nouveaux médicaments. Les derniers antibiotiques mis sur le marché datent de 1987 et les grandes entreprises pharmaceutiques ont depuis lors réorienté leur recherche et développement (R&D) vers d'autres types de médicaments plus rentables. Les antibiotiques sont en effet chers et difficiles à développer, alors qu'ils ne sont généralement utilisés que durant une période d'une à deux semaines. S'attaquer au problème de la résistance aux antibiotiques passera donc par une meilleure gestion des traitements existants, et implique un changement des attitudes et des comportements de chacun. Le problème est délicat et soulève de nombreuses questions. Quelle est votre perception de la santé ? En quoi votre comportement influe-t-il sur le risque que vous tombiez malade ? Que faudrait-il

pour vous convaincre de changer vos réflexes médicaux ? S'attaquer à ces questions nécessitera une approche combinant à la fois sciences biomédicales et sciences sociales.

Une meilleure compréhension des habitudes sera tout aussi importante pour faire face à d'autres types d'infection. Il est par exemple probable que la diminution des comportements à risque en Afrique de l'Ouest ait contribué à juguler Ebola. Beaucoup des foyers d'infections avaient pour origine les interactions familiales et les rites funéraires ; il a suffi que ces habitudes changent pour que la prolifération du virus s'en trouve freinée. Nous ne comprenons hélas pas encore très bien quand et comment ces changements sont intervenus, ni quelle importance ils pourraient avoir à l'avenir.

Dans le domaine de la santé, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la façon dont les gens se déplacent et interagissent à travers le monde. Des enquêtes et des récoltes de données issues des téléphones mobiles et de l'imagerie satellite sont actuellement en cours. Il sera bientôt possible d'établir un lien entre ces données et d'autres issues du séquençage génomique ou de l'analyse environnementale afin d'étudier le développement des infections à différentes échelles. Nous ne nous focaliserons plus sur les seules caractéristiques biologiques d'une maladie, ou ses conséquences sur une population particulière, mais nous analyserons simultanément l'infection, son évolution, son environnement et les comportements des patients. Cette approche globale permettra aux systèmes de santé d'élaborer des stratégies de contrôle de la maladie spécifiques à chaque population et région touchée. Ces avancées seront notamment importantes dans les situations où les antécédents infectieux influent sur le risque de développer la

maladie. Le cas de la dengue en est un bon exemple : une première exposition à une souche de dengue rendra la deuxième infection beaucoup plus sévère. C'est pourquoi une étude de l'OMS de 2016 a recommandé que les campagnes de vaccination contre la dengue tiennent compte de l'histoire de l'infection au sein de la population concernée. Une telle approche impose toutefois de collecter un grand nombre d'échantillons sanguins localement et d'effectuer de multiples tests en laboratoire. Heureusement, de nouvelles techniques d'analyses sanguines rendent déjà plus facile et moins coûteuse l'identification des agents pathogènes ayant précédemment affecté une population donnée. Plus le nombre d'informations à disposition sera important, plus ces approches personnalisées deviendront la norme pour chaque maladie, dans chaque pays.

Médecine sur mesure

Ces pratiques deviendront également courantes dans d'autres domaines médicaux. En 2015, le président Barack Obama a lancé *l'Initiative pour la médecine de précision*. L'objectif est la mise au point de traitements personnalisés en fonction du profil génétique de chaque patient, de son environnement et de son mode de vie, plutôt que l'approche globale en vigueur actuellement. Bien que ce soit déjà le cas dans une certaine mesure pour les transfusions sanguines (qui tiennent compte du groupe sanguin), ces méthodes reposeront sur le séquençage du génome ainsi que d'autres tests innovants pour prédire ce que sera l'efficacité d'un traitement sur un patient donné. Certains médicaments anticancéreux ne sont par

exemple efficaces que sur des tumeurs présentant un profil génétique particulier. De même, l'Ivacaftor, un médicament employé pour le traitement de la mucoviscidose, n'est efficace que pour environ 5% des patients, porteurs de certaines mutations génétiques.

Avec ce nouveau paradigme de précision, la médecine passera de réactive à proactive. Plutôt que de traiter une maladie lorsqu'elle survient, les données récoltées permettront de prévenir le problème avant même d'avoir à le traiter. Les tests génétiques permettent déjà d'anticiper l'apparition de maladies héréditaires spécifiques, mais ils se concentrent généralement sur une mutation dangereuse, comme celle du gène BRCA1. Une femme porteuse de cette mutation présente deux chances sur trois de développer un cancer du sein au cours de sa vie. Dans ce cas de figure, il est possible de réduire le risque par la chirurgie préventive. C'est la présence de cette mutation qui a par exemple décidé l'actrice Angelina Jolie à recourir à une double mastectomie en 2013.

Plutôt que de s'attacher à certains gènes spécifiques, nous analyserons bientôt des génomes entiers. Ce qui signifie une masse colossale de données : les chercheurs du laboratoire de Cold Spring Harbor, dans l'État de New York, estiment qu'en 2025 les données relatives au génome humain occuperont davantage de mémoire de stockage que YouTube ou Twitter. Toutefois, le coût du séquençage du génome n'inclut pas la complexité de l'analyse des données. Dans certains cas, le lien entre un gène donné et une affection particulière – comme le BRCA1 et le cancer du sein – a été mis en évidence par le biais d'études cliniques à large échelle. Dans l'idéal, une règle simple serait donc que la mutation A dans le gène B

entraîne la maladie C. Malheureusement, si des gènes multiples sont impliqués dans la prédisposition à une maladie, ou si une maladie est rare, il est beaucoup plus difficile d'évaluer les risques encourus. Il devient alors très difficile d'estimer quel sera le traitement préventif le plus approprié.

Pour illustrer cette difficulté prenons l'exemple d'une maladie relativement rare qui affecterait 500 personnes sur un million, et imaginons qu'il existe un test permettant de mettre en évidence la prédisposition à cette maladie. Admettons que ce test soit précis à 99%. Si vous passez le test et que le résultat est positif, quelles sont les chances que vous développiez la maladie ? Étonnamment, la réponse est de seulement 5%. En effet, pour chaque million de personnes testées, nous aurons donc 495 personnes présentant un résultat positif, et qui développeront la maladie (et non 500, en raison de la fiabilité de 99% du test). De même, 1% des 999 500 personnes restantes, soit 9995 d'entre elles, ne développeront pas la maladie en dépit d'un résultat positif (une fois encore, en raison de la limite de 99% du test). Le total des personnes positives au test sera donc de $495 + 9995$, soit 10 490, dont seules 495 (soit environ 5%) développeront effectivement la maladie.

Ce pourcentage a été obtenu sur la base d'un excellent test, précis à 99%. Si nous avons un test moins fiable, les résultats deviendraient plus délicats encore à interpréter. C'est pourquoi un diagnostic inclura dans la mesure du possible d'autres facteurs comme les antécédents familiaux. À l'heure actuelle, les patients confrontés à cette situation peuvent recevoir l'assistance de conseillers en génétique afin de se faire expliquer les probabilités et ce qu'elles signifient. En l'état, les conseillers offrent des

informations plutôt que des recommandations. Mais à mesure que les tests génétiques se banalisent, les options peuvent devenir plus complexes et les choix plus difficiles à arbitrer, plus encore si les traitements possibles sont limités. Voudriez-vous savoir si vous avez une prédisposition à une maladie incurable ? Comment réagiriez-vous aux résultats de tests dont l'incertitude reste élevée ?

Les patients prendront de plus en plus le contrôle de leurs données et déposséderont progressivement les médecins de la responsabilité de décision. À l'avenir, il incombera à chacun de nous de gérer les risques sanitaires prédits par la science. Nous devons choisir à quelle information nous souhaitons accéder et comment agir en conséquence. Ce qui signifie être en mesure de peser le pour et le contre, et de faire un choix entre les bénéfices potentiels d'un traitement et les dommages que pourrait entraîner un diagnostic erroné. En 2016, des docteurs de la clinique Mayo, dans le Minnesota, ont rapporté le cas suivant. Un défibrillateur cardiaque a été implanté à un patient à la suite d'un test génétique suggérant qu'il était porteur d'une dangereuse mutation. Lorsqu'il est revenu à la clinique pour un deuxième avis, il s'est avéré que les résultats du test avaient été mal interprétés ; en réalité il ne courait aucun risque significatif.

Les patients ne sont pas les seuls à s'intéresser aux résultats des tests génétiques. Aux États-Unis, les compagnies d'assurances-maladie ne sont pour l'heure pas autorisées à refuser une couverture au motif qu'un client est porteur d'une mutation génétique. La loi de 2008 sur la non-discrimination génétique le leur interdit encore, fort heureusement. Mais tel n'est pas le cas pour les compagnies d'assurances-vie : certaines ont refusé des porteurs de

la mutation du gène BRCA1. Si la législation ne s'adapte pas aux progrès rapides de la médecine prédictive, celle-ci risque à terme d'influencer l'accès au logement ou à l'emploi.

À mesure que nos connaissances sur les maladies héréditaires progressent, la notion même de patient se trouble. En 2015, une femme a assigné l'hôpital public St-George à Londres auprès de la Haute Cour britannique, car elle n'avait pas été informée que son père, dont elle vivait éloignée, souffrait d'une maladie héréditaire rare : la chorée de Huntington. Lorsqu'en 2009 le diagnostic a été établi, les médecins ont conseillé au père d'en informer sa fille, ce qu'il a refusé de faire. Enceinte à cette période, elle n'apprendra qu'en 2013 qu'elle est porteuse de la maladie. Cette assignation pose donc la question de la responsabilité des médecins. Devaient-ils transmettre cette information aux membres de la famille, indépendamment des souhaits du malade ? Les juges ont conclu que les médecins avaient eu raison de maintenir la confidentialité. C'est la première fois qu'un tribunal a statué sur le devoir du corps médical à révéler ou non les risques héréditaires aux membres d'une famille. Il est vraisemblable que ces questions seront plus aiguës à l'avenir.

Les familles joueront un rôle central lorsque la médecine déplacera son attention des maladies transmissibles vers les affections chroniques. Les maladies du cœur, le diabète et l'obésité posent problème depuis longtemps dans les pays riches, mais elles sont désormais en augmentation dans les pays pauvres et émergents. Entre 1975 et 2014, l'obésité est passée de 6% à 11% de la population mondiale chez les hommes, et de 6% à 15% chez les femmes. Ironiquement, les progrès des traitements médicaux

contribueront au développement des maladies chroniques pour la simple raison que de nombreuses situations aujourd'hui fatales deviendront gérables, sinon anticipables. Dans les années à venir, les chercheurs trouveront de nouveaux moyens de stopper ou de ralentir les maladies dégénératives comme Alzheimer. Des implants contrôleront en permanence l'état des patients et ajusteront les traitements en temps réel. Les cellules-souches répareront ou remplaceront les tissus endommagés. En 2016, une équipe du Centre de Biologie du Développement Riken au Japon a annoncé qu'elle avait réussi à faire pousser en laboratoire de la peau de souris, incluant les glandes et les follicules pileux. Plutôt que d'utiliser de la peau provenant d'autres parties du corps pour traiter des blessures comme les brûlures graves, on aura donc peut-être bientôt recours à de la peau neuve, entièrement créée *in vitro*. Dans le même temps, d'autres groupes ont développé en laboratoire des tissus susceptibles de réparer quantité d'objets, depuis les vessies et les cornées jusqu'aux ovaires et aux vaisseaux sanguins. Les progrès de la médecine ont déjà pour conséquence une longévité jusqu'ici inégalée. Alors que nous nous apprêtons à survivre à d'innombrables problèmes de santé, notre société devra également s'adapter en circonstance afin de faire face aux coûts représentés par ces soins au long terme.

Un monde plus connecté

La structure de la société aura aussi une incidence sur notre santé. En 1970, seules deux villes dans le monde comptaient plus de 10 millions d'habitants : Tokyo et New York. Il existe aujourd'hui

37 mégalo­poles de taille égale ou supérieure. Nombre de leurs habitants vivent dans des conditions misérables et il est probable que la situation empirera encore à l'avenir. Les Nations Unies ont estimé que jusqu'à deux milliards de personnes vivront dans des bidonvilles en 2030. Des maladies comme Ebola ou la dengue trouvent dans ces environnements urbains déshérités et à forte densité de population des terrains favorables pour se répandre rapidement. Pendant des décennies, Ebola n'a pas été considéré comme une menace majeure pour la santé publique. Le virus avait bien causé deux douzaines de petites flambées de fièvre hémorragique ici ou là en Afrique centrale, principalement dans des régions rurales, mais rien ne laissait supposer qu'il pourrait un jour causer une épidémie. Pourtant, début 2014, la maladie a frappé presque simultanément trois villes d'Afrique de l'Ouest. Peut-être découvrirons-nous bientôt d'autres agents pathogènes qui vivent dans des régions rurales sans faire trop de dégâts, mais qui une fois transportés en zone urbaine, se développeront rapidement.

Les grandes villes présenteront d'autres risques sanitaires. Des recherches menées par l'Institut de mesure et d'évaluation sanitaire aux États-Unis suggèrent que plus de cinq millions de gens meurent chaque année prématurément dans le monde en raison de la pollution atmosphérique. Plus de la moitié de ces décès ont lieu en Chine et en Inde, qui cumulent 12 mégalo­poles.

Non seulement les villes grandissent, mais se connectent davantage entre-elles. Chaque jour, plus de 100 000 vols commerciaux relient les aéroports du monde entier. Ceci explique pourquoi l'épidémie de grippe de 2009 a pu faire le tour du monde en quelques semaines seulement, et comment la souche d'*E. Coli*

résistante à la colistine, repérée pour la première fois en Chine à la fin de l'année 2015, a pu apparaître en Pennsylvanie quelques mois plus tard. Le réseau aérien modifie la géométrie des infections : nos mappemondes traditionnelles faussent l'idée de la façon dont nous sommes réellement connectés et comment une contagion peut se répandre. Si l'on considère les liaisons aériennes, alors certaines villes sont beaucoup plus proches les unes des autres que sur la carte.

Le savoir médical se diffusera également dans le monde plus aisément que par le passé. En 2016, durant la guerre civile en Syrie, des chirurgiens hautement qualifiés ont guidé par webcam, depuis la Grande-Bretagne ou le Canada, des médecins locaux pour réaliser des interventions chirurgicales en zone de guerre. Avec les progrès constants de la réalité augmentée et de la robotique, des actes chirurgicaux complexes pourront bientôt être exécutés à distance. Le partage mondial des données facilitera également les traitements à domicile. Plutôt que de chercher à obtenir un rendez-vous avec leur médecin, les patients discuteront de leurs problèmes avec des logiciels de triage à base d'intelligence artificielle et, au besoin, bénéficieront de consultations « immersives » par réalité augmentée sans devoir quitter leur domicile. Des images de scanners d'imagerie par résonance magnétique (IRM) aux échantillons analysés par microscopes, il sera possible d'interpréter le matériel brut à l'aide de logiciels de reconnaissance de formes connectés à des données médicales globales. Les médecins pourront alors juger du risque d'un traitement donné en comparant instantanément l'état de santé de leur patient avec un nombre considérable de cas similaires. Et lorsqu'une nouvelle maladie se déclarera – que ce soit Ebola ou une

nouvelle souche d'*E. coli* résistante – les organismes sanitaires pourront rapidement analyser ses liens avec d'autres infections apparues à proximité et mettre au point la meilleure méthode pour l'enrayer.

Tout ceci nous ramène à la question de savoir si nous devons être optimistes ou non quant à l'avenir de la médecine. Même si nous améliorons nos défenses face aux maladies actuelles et que nous éradiquons des fléaux comme la malaria, la polio ou la rougeole, d'autres maux viendront les remplacer, que ce soit des bactéries résistantes ou des maladies chroniques dues aux changements de nos modes de vie. Il se pourrait que les améliorations que nous sommes en mesure d'apporter à la santé humaine touchent un jour leurs limites, même dans un lointain avenir. L'interconnexion de notre monde engendrera de nouvelles menaces sanitaires et de nouveaux défis biologiques, technologiques et sociaux. Mais la dimension de plus en plus globalisée de la médecine donnera également naissance à de nouvelles idées et approches inédites qui nous permettront de relever, voire d'anticiper ces défis. En définitive, notre salut dépendra de l'interconnexion mondiale et de la collaboration qui en résultera.

5 Génomique et ingénierie génétique

Aarathi Prasad

La biologie sera la science dominante du siècle prochain.

Freeman Dyson, 1996

La génétique est l'étude de l'ADN – plus précisément, c'est l'étude de petites sections d'ADN appelées gènes et de tous les éléments qui les contrôlent. Les gènes sont les unités de notre hérédité, les fichiers du logiciel de notre corps. Ils contiennent des instructions – du code à exécuter. À côté des gènes, il y a d'autres fichiers de code qui spécifient quand ce dernier doit se mettre au travail, et avec quelle intensité. Le code de la plupart des gènes est lu et traduit sous forme de protéines : les éléments de base des tissus et organes, des hormones, des anticorps et des systèmes de transport cellulaires. Ainsi les gènes déterminent une grande part de notre forme physique, de notre santé et de notre potentiel.

L'ingénierie génétique, c'est la manipulation des gènes. Ce principe a une longue histoire. Le bricolage génétique *low-tech* (c.-à-d. la sélection artificielle) a transformé des épis, semblables à de simples fleurs il y a 10 000 ans, en la succulente forme quadrangulaire du maïs moderne. Il a aussi changé les loups en chiens de salon. Plus récemment en laboratoire, l'ingénierie génétique a créé des plantes qui jouent le rôle de réacteurs pour

l'industrie pharmaceutique ainsi qu'une variété de riz riche en vitamine A, laquelle est cruciale pour notre système immunitaire et notre vision. Nous manipulons également les gènes pour mettre au point des thérapies, combattre les infections, créer des sources durables d'énergie ou d'alimentation. Mais la manière dont nous procédons inaugure un monde entièrement nouveau, fait de technologies de pointe dont le potentiel n'est pas encore pleinement exploré.

La génomique quant à elle vise à collecter et à cartographier des ensembles complets de données génétiques. Il s'agit de compiler des informations. Ce domaine tire son origine de la génétique et de la biologie moléculaire – des sciences qui se préoccupent de protéines et de matériel génétique : l'ADN et l'ARN. La génomique cherche ainsi à cataloguer la construction et la machinerie des molécules de la vie à l'intérieur de nos cellules. Il y a tout juste plus de dix ans, on complétait la première lecture de l'ensemble des bases chimiques qui forment la séquence entière de l'ADN humain. Représentées par différentes combinaisons de quatre lettres seulement – A, C, T et G – elles composent notre génome, soit la totalité de notre matériel génétique exprimé en une chaîne de 3 milliards de lettres contenant environ 20 000 gènes. Si elle était écrite en une séquence continue de caractères de la taille de ceux que vous êtes en train de lire, elle irait de Londres à Rio de Janeiro. Aujourd'hui le génome humain fait partie d'une bibliothèque comptant un peu plus de 4000 organismes, des virus et bactéries aux chimpanzés, ornithorynques et à la plante *paris japonica* (laquelle contient un ADN cinquante fois plus massif que le nôtre). Mais le but n'est pas d'accumuler des catalogues de code

biologique. Prenons par exemple l'application de la génomique en médecine. On envisage ainsi le déroulement des opérations : en premier lieu, nous devons comprendre la structure du génome et rassembler d'autres catalogues pertinents afin d'identifier tout ce qui concourt au fonctionnement des gènes ; en second lieu, nous devons saisir la biologie du génome – ce que signifient ces instructions, quelles parties du génome sont des instructions et lesquelles n'en sont pas ; si elles n'en sont pas, en quoi étaient-elles si importantes, de sorte qu'elles sont restées présentes au cœur du génome pendant l'évolution ; ensuite, il s'agit d'élucider ce que cette carte nous dit sur la biologie des maladies, pour répondre à un certain nombre de questions. Par exemple, comment et pourquoi notre ADN prévient-il ou peut-être même favorise-t-il certaines pathologies ? Comment interagit-il avec celui des micro-organismes qui peuvent nous infecter ? Enfin, comment pouvons-nous utiliser ces connaissances approfondies pour concevoir des médicaments ciblés qui fonctionnent de manière plus intelligente, dans l'espoir d'améliorer l'efficacité des soins de santé ?

Cela fait seulement deux décennies que nous avons acquis les bases de la lecture du génome et commencé à comprendre ce qui est écrit dans ce manuel d'instructions génétiques. Nous n'avons pas encore identifié toutes les parties fonctionnelles du génome humain, que ce soit les gènes ou d'autres choses (par exemple, certaines sections de notre ADN ne sont présentes que pour garantir la stabilité et l'organisation du génome). C'est à ces questions que se confrontera une grande part des recherches futures en génétique. Pour autant nous savons déjà interpréter de nombreux éléments. Après la publication du génome humain complet en 2004, il n'a fallu

attendre que deux années supplémentaires avant que n'apparaisse sur le marché le premier test du génome entier. Entre 2007 et 2014 dans les seuls États-Unis, un demi-million de consommateurs ont acheté des kits de tests à domicile afin d'obtenir l'accès aux informations de leur génome. Globalement, que ce soit en ligne ou en boutique, le marché ne montre aucun signe de fléchissement. Au cours des deux prochaines décennies non seulement nous lirons nos génomes avec aisance mais nous creuserons aussi plus profondément ; nous exploiterons l'information génétique déjà en stock ; nous briserons avec toujours plus d'expertise la sécurité qu'assurait l'anonymat – pour le meilleur et pour le pire.

Alors que nous avons déjà dépassé le stade du bricolage avec les codes génétiques présents dans la vie sur notre planète, commence un nouvel âge de pure ingénierie génétique. Car une fois acquises la lecture du code génétique et la maîtrise de sa grammaire, nous pourrions l'écrire nous-mêmes. À l'avenir, nous allons concevoir de l'ADN de plus en plus complexe et ouvrir la voie au cours des prochaines décennies à la création de nouvelles formes de vie terrestre ou à la résurrection des espèces éteintes. Enfin, bien que cela semble moins important des points de vue philosophique ou évolutionnaire, l'utilisation du code biologique en dehors des sciences de la vie deviendra une réalité quotidienne, dans nos espaces de travail et domestique. Après tout l'ADN est un code qui se réplique de manière autonome. Pendant près de quatre milliards d'années, il a répondu avec opiniâtreté aux changements de l'environnement en s'adaptant et en se diversifiant sans intervention humaine. En comprenant le génome et en maîtrisant ce que l'ADN accomplit avec tant d'aisance – l'autoapprentissage,

l'adaptation réactive, la réplication autonome : toutes choses que les machines non biologiques ont tant de mal à faire – la discipline à l'interface entre l'informatique et la machinerie génétique connaîtra une révolution.

La génétique et la génomique du futur peuvent nous conférer de nouveaux pouvoirs : elles approfondissent notre compréhension, étendent notre capacité à manipuler le corps et l'environnement et permettent la conception de technologies plus personnalisées. Comment allons-nous tirer avantage de ces progrès ? Qu'allons-nous faire de notre connaissance croissante des gènes et des génomes ? Voici quelques-unes des révolutions technologiques qui ouvrent la voie au nouvel âge de la génétique.

Détecter le génome

Il n'y a pas si longtemps, la seule analyse de l'ADN – sans parler du séquençage de génomes entiers – impliquait l'utilisation de grosses et onéreuses machines dans des laboratoires spécialisés. En l'an 2000 la première ébauche de séquençage du génome humain resta dans les annales pour sa durée de quinze mois et son coût d'environ 300 millions de dollars. En 2006 le séquençage du génome d'un individu coûtait 14 millions de dollars. Dix ans plus tard le prix était d'environ 1500 dollars et la durée passait sous la barre des 48 heures. Désormais le séquençage est en train d'échapper aux laboratoires et même aux mains des spécialistes. Au lieu de grosses machines les séquenceurs actuels tiennent dans votre poche. Ces appareils ne peuvent pas encore cartographier l'ensemble de votre génome, mais ouvrez l'œil ! Pour l'heure ils sont développés afin

d'étudier en temps réel les gènes dont l'importance est connue dans ces cas particuliers. De récents progrès permettent de détecter les données génomiques : par exemple une bactérie ou une souche virale ayant infecté une personne. Cette technologie est déjà prometteuse pour gérer des problèmes de santé publique là où l'on en a le plus besoin. En Afrique de l'Ouest un tel séquenceur portable a été utilisé avec succès pour identifier les génomes du virus Ebola chez 148 patients. Avec ce type de technologie miniaturisée et facile d'emploi on espère à l'avenir être capable d'effectuer des diagnostics sur le terrain en quelques heures. Il s'agit d'orienter les choix de traitement contre des affections virales comme le coronavirus, la dengue, Ebola, le chikungunya ou Zika. De tels dispositifs pourraient un jour se retrouver dans la poche de tout un chacun comme les téléphones portables.

À une échelle plus petite encore nous commençons à utiliser des semi-conducteurs pour détecter l'ADN. Chris Toumazou, de l'Imperial College à Londres, a récemment développé une puce insérable dans une clé USB qui fournit en quelques minutes des résultats consultables sur n'importe quel ordinateur. Ignorant délibérément la plupart des 3 milliards de bases du génome humain, il se limite au 1% grâce auquel nous nous différencions les uns des autres. Sa technologie à base de semi-conducteurs est en train de générer nos propres « adresses IP biologiques ». Dans ces clés USB, diverses puces cherchent des mutations génétiques spécifiques – pour vérifier par exemple si nous présentons un terrain favorable à telle ou telle maladie, ou encore pour déterminer avec quelle efficacité un individu pourra métaboliser certains médicaments. Comme l'illustre Chris Toumazou, « votre médecin ne

consultera plus vos archives médicales ; il consultera votre futur médical. »

Utiliser le génome

Si la révolution génomique a un potentiel en termes de santé humaine, elle ira beaucoup plus loin. Les instructions à l'origine de toute forme de vie sont encodées dans le génome. Ces dernières années sont apparues de nouvelles et plus subtiles techniques de manipulation génétique. Elles ont ouvert des possibles qui auraient bien pu rester dans le domaine de la science-fiction. C'est pour une grande part la conséquence d'une remarquable innovation due à Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier qui ont récemment inventé ce qui est devenu la technique d'ingénierie génomique la plus puissante au monde. Cette méthode s'appelle CRISPR. Elle a été conçue comme un nouveau système de manipulation de l'ADN. Elle nous a permis d'examiner plus minutieusement la fonction de certains gènes en les activant ou les désactivant, ou en coupant l'ADN en des emplacements précis afin de modifier ou d'ajouter une séquence dans l'intervalle. En théorie cela veut dire que l'on peut précisément retirer la version défectueuse d'un gène qui provoque des maladies cellulaires et la remplacer par une version « saine » et fonctionnelle. Mais cette technologie permet également des manipulations autres que l'édition du génome. À l'avenir elle pourra nous aider à comprendre la fonction des 98% de l'ADN qui ne codent pas de protéines, et à dépasser l'alphabet du génome pour saisir sa grammaire et sa ponctuation. Pour une part, ces progrès découleront de la possibilité d'enclencher ou d'éteindre un gène à

volonté. Des recherches en cours utilisent la lumière afin de contrôler l'emplacement, le moment ou la réversibilité des changements que nous apportons au génome. Cette technique est au croisement d'un autre domaine en croissance rapide, appelé optogénétique, où l'on contrôle les cellules à l'aide de faisceaux lumineux et qui est actuellement utilisé en laboratoire pour approfondir notre compréhension du cerveau. On espère que dans les deux prochaines décennies ce domaine apportera de nouveaux éclairages sur un éventail de pathologies, y compris les maladies neurodégénératives comme Parkinson et Alzheimer, mais aussi l'épilepsie, l'infarctus et la perte d'audition pour lesquelles on manque de traitement efficace. En outre on développe en ce moment même des « cachets CRISPR » – des séquences d'ADN comestibles qui forcent à l'autodestruction les bactéries résistantes aux antibiotiques.

Nous commençons déjà à voir apparaître de nombreuses autres applications des technologies issues de CRISPR qu'elles soient d'importance vitale (la lutte contre la disparition des abeilles) ou plus frivole (des chiens, des cochons nains ou des carpes koïs aux couleurs personnalisables). Dans les prochaines décennies cette technologie pourrait aussi permettre la production d'animaux d'élevage résistants aux infections, ou la mise au point de circuits biologiques sophistiqués qui convertissent des cellules en usines à biocarburant. On envisage même de produire des « poulets CRISPR » : les outils d'édition CRISPR seraient directement intégrés dans le génome du volatile. Parmi les applications potentielles, il y a ce qu'on appelle des « produits

pharmaceutiques » – par exemple des poules transgéniques dont les œufs contiendraient une molécule anti cholestérol.

Il existe également des projets de semi « résurrection » d'espèces éteintes. Des travaux ont commencé pour modifier des embryons d'éléphants afin de produire des pachydermes arctiques analogues aux mammouths laineux, ou des embryons de columbidés pour ramener à la vie une version du pigeon migrateur que nous avons chassé jusqu'à l'extinction au siècle dernier.

Génétique, informatique et biohacking

Maintenant que nous savons le lire, il est aisé de comprendre comment l'ADN peut se comparer au codage informatique. La révolution numérique des dernières décennies a catalysé la révolution génomique. Désormais c'est l'ADN qui prolonge ce dialogue par de nombreuses manières. L'ADN offre indiscutablement une forme de stockage de données à la durée de vie bien plus longue que celle des différents supports que nous avons vus apparaître et disparaître au fil des années. Au contraire des disquettes et CD-ROM il restera utilisable tant qu'il y aura sur Terre des gens avec les moyens de le lire. Un autre avantage du stockage ADN est la taille. Notre génome entier tient dans le noyau d'une cellule qui mesure typiquement entre 2 et 10 microns de large. Pour se donner une idée, un micron représente un millionième de mètre. Le diamètre d'un cheveu humain est d'environ 75 microns. Afin de démontrer le concept on a récemment exploité le stockage ADN pour enregistrer des fichiers texte et audio, dont les 154 sonnets de Shakespeare et un fragment de 26 secondes du discours de Martin

Luther King *I have a dream*. Pour ce faire on a utilisé l'encodage binaire standard de l'électronique et de l'informatique, mais en figurant les bits (les zéros et les uns) avec différentes combinaisons des bases ADN que sont A, C, G et T. Un bit est la plus petite unité d'information qui peut être enregistrée ou manipulée sur un ordinateur. Ainsi pour les sonnets de Shakespeare, on a encodé 5,2 millions de bits dans de l'ADN.

Hormis le stockage mémoire, l'informatique ADN semble promise à un avenir fascinant quoique quelque peu imprévisible. Cela a commencé par la résolution d'un ensemble de problèmes complexes qui captivaient l'attention des informaticiens – des problèmes dus au coût et aux limites techniques que pose la miniaturisation des composants des ordinateurs, tablettes et smartphones toujours plus compacts, dont nous sommes si dépendants. La progression constante de la miniaturisation est sur le point d'atteindre un plafond – chez Intel, les scientifiques prédisent que cela surviendra dès 2018. Mais avec les ordinateurs à ADN, chaque molécule figure une donnée entrante tandis que d'autres molécules biologiques comme les protéines peuvent jouer le rôle de microprocesseurs. Alors que dans les ordinateurs traditionnels les données sont traitées séquentiellement, ce qui prend du temps, les ordinateurs ADN traitent l'information en parallèle. Cela accélère considérablement les choses. On est parvenu à exécuter des calculs avec de l'ADN ou de l'ARN en suspension dans des tubes à essai ou sur des plaques de verre comme des lames de microscope recouvertes d'or disposé comme sur un circuit imprimé. Sur cette surface viennent s'attacher des molécules d'ADN qui encodent de possibles solutions à des problèmes de calcul.

Cette technologie pourrait aussi être utilisée en des lieux et à des échelles inaccessibles aux ordinateurs traditionnels : à l'intérieur d'une cellule ou au sein de matériaux synthétiques extrêmement minces. Cela ouvre de nouvelles possibilités. De minuscules bio-ordinateurs pourraient être envoyés dans des cellules vivantes pour identifier les tissus malades, exécuter de manière sélective une séquence d'autodestruction ou encore reprogrammer l'ADN endommagé. Par exemple, nous pourrions reconfigurer les cellules cancéreuses de façon à ce qu'elles ne croissent plus en tumeur, ou les cellules-souches afin qu'elles génèrent un organe de remplacement. On a déjà démontré que de tels bio-ordinateurs peuvent gérer l'administration de substances actives, y compris certains médicaments.

De même, il existe quelques exemples impressionnants de circuits moléculaires basés sur l'ADN – l'un encode une version du jeu de tic-tac-toe (et interagit avec un adversaire humain) ; un autre calcule des racines carrées ; des réseaux neuronaux présentent un comportement comparable au cerveau. Mais pour l'heure, imiter la logique numérique de l'informatique reste un objectif aussi fuyant que frustrant. Les ordinateurs à ADN sont loin de rivaliser avec leurs homologues de silicium dans l'exécution d'un algorithme.

Quoi qu'il en soit, ce domaine est en train d'ouvrir la voie à d'enthousiasmantes applications biologiques et biomédicales. Dans les décennies à venir, l'informatique ADN donnera naissance à de nouveaux dispositifs qui pourront servir de biocapteurs, être utilisés pour des diagnostics, pour la nanofabrication, ou pour contrôler le programme biologique de nos propres cellules. Elle jouera un rôle dans le développement et l'administration de « médicaments

intelligents » précisément là où ils sont nécessaires. Ces substances détecteront et analyseront quantité de signaux physiologiques, et accompliront des tâches logiques afin de libérer des principes actifs ou de réguler l'expression des gènes. Au-delà d'une promesse de bien-être et de qualité de vie, les recherches à la croisée de l'ADN et de l'informatique pourraient aussi nous permettre de mieux comprendre comment certains événements se sont succédés dans la nature grâce auxquels est apparue la vie telle que nous la connaissons.

De même que les premiers ordinateurs grands comme des armoires et accessibles aux seuls spécialistes ont évolué vers des dispositifs portables et abordables, on peut prédire que les gens exploiteront de plus en plus les technologies génétiques dans leur espace privé, hors des laboratoires. Où et comment utilise-t-on la génétique et la génomique, qui en sont les usagers ? Les pratiques ont déjà considérablement évolué et il est certain qu'elles vont encore se démocratiser.

Ces évolutions créent des possibilités et posent de nouveaux défis. Médecins et patients ont rapidement adopté la personnalisation que permet la révolution génomique. La médecine personnalisée est déjà une réalité dans de nombreux secteurs que ce soit pour ajuster le dosage d'un médicament ou choisir le meilleur traitement contre une leucémie, un VIH ou un cancer colorectal. Ces pratiques sont également devenues beaucoup plus courantes parmi les personnes bien portantes qui souhaitent investiguer leur futur état de santé. Désormais nous sommes nombreux à utiliser des kits et des services disponibles en magasin ou en e-commerce pour accéder à notre génome, ou à travers des tests d'ascendance

génétiq ue vendus directement aux consommateurs. Chercheur chez Autodesk, Andrew Hessel travaille sur la conception de nanoparticules, de nouvelles techniques de synthèse de l'ADN ou la cartographie du génome humain. Il affirme que le *business model* du séquençage de l'ADN est en train de changer. Il existe déjà des entreprises qui séquencent gratuitement le génome mais vendent ensuite des analyses et autres services. D'autres paieront pour réaliser le séquençage de certains individus présentant des caractéristiques dignes d'être passées au crible par des *data miners*. Imaginez que l'on identifie les causes génétiques de caractéristiques souhaitables comme ne pas perdre ses cheveux, ne pas les voir blanchir ou éviter des pilosités mal placées ; conserver une apparence jeune à un âge avancé, avoir de modestes besoins en sommeil, une meilleure vue, une meilleure vision nocturne ? En examinant le génome de ceux qui possèdent ces qualités, on franchit peut-être une première étape vers la découverte de molécules qui permettront à d'autres d'acquérir ces traits désirables.

Mais pour glaner nos informations génétiques encore faut-il mettre la main sur un échantillon de notre ADN : nous crachons littéralement le secret de notre génome dans un tube plastique et l'envoyons par la Poste à un laboratoire où de petites sections seront lues et une analyse renvoyée par Internet. Cela peut sembler inoffensif. Vous ne prenez sans doute pas au sérieux la révélation de votre ascendance viking ou de votre lignage perdu avec Cléopâtre. Mais si l'on ne peut encore tirer de vos données génétiques que des interprétations limitées, il est prévu qu'elles présentent un risque potentiel dans la prochaine décennie. Non seulement le génome humain identifie de manière univoque son propriétaire, mais il

contient aussi des informations sur ses ascendants ethniques et sa prédisposition à telle ou telle maladie, y compris les troubles mentaux. Les implications sont sérieuses en termes de protection de la sphère privée.

Emiliano de Cristofaro, expert en sécurité informatique et protection de la vie privée à l'University College de Londres, sonne l'alerte : même les récentes initiatives publiques en matière de santé publique, qui visent à créer des bases de données pour « le bien commun », exigent des patients et des donneurs qu'ils renoncent fondamentalement à leur sphère privée. Selon le chercheur, l'anonymisation génomique – ôter certaines sections qui permettraient d'identifier le propriétaire d'un génome – est peu efficace. Par exemple, une équipe de scientifiques est récemment parvenue à découvrir les identités d'individus sur la seule base des informations disponibles sur des sites de généalogie. Ces sites ne disposaient pas même de données complètes de séquençage mais seulement de petits fragments déconnectés des génomes de ces personnes.

Selon Emiliano de Cristofaro, ce qui rendra moins sûre la diffusion de nos données ADN, ce n'est pas seulement l'augmentation à venir de la puissance des ordinateurs, mais aussi le fait qu'il pourrait sembler peu risqué de dévoiler des portions du génome dont on ignore pour l'instant la fonction. Or à mesure que nous comprendrons mieux le génome, ces fragments pourraient bien finir par être utilisés contre leurs propriétaires. Il n'est pas farfelu de penser qu'un jour les données ADN pourraient être utilisées comme arme. En connaissant les particularités du génome cible, font observer certains, nous pourrions créer des armes biologiques

personnalisées qui pourraient abattre leur cible sans laisser de traces. Plus banalement, Emiliano de Cristofaro pose la question suivante :

« Que se passera-t-il quand nous découvrirons qu'une mutation est liée à un trouble mental ? Une fois que l'information est publique, vous ne pouvez plus la récupérer. N'oublions pas que les données génomiques soulèvent des questions de sécurité sans précédent, puisque le génome d'une personne ne s'altère pas avec le temps et qu'il contient aussi des informations sur ses proches parents. Si le mot de passe de votre ordinateur est rendu public, vous pouvez le réinitialiser. Mais vous ne pouvez pas réinitialiser votre génome. »

Dans un avenir un peu plus utopique, la démocratisation suivra la voie tracée depuis une dizaine d'années. Des laboratoires communautaires sont apparus dans nos villes, où des gens sans formation scientifique favorisent l'apparition de technologies abordables et accessibles. Des non-scientifiques ont commencé à travailler sur toutes sortes de projets, de la production d'insuline bon marché jusqu'au bricolage génétique de plantes comestibles. Les progrès de la génétique ouvrent également un espace récréatif : par exemple transformer en code-barres une séquence ADN présente dans une confiture ou rendre les bactéries luminescentes dans l'obscurité comme les lucioles.

Andrew Hessel pense qu'au-delà de ces développements, les biotechnologies pénétreront à l'avenir dans presque tous les foyers. De même que nous avons tous des ordinateurs personnels, l'accès au Web et maintenant au cloud, le futur verra apparaître dans nos

maisons des instruments biotechnologiques faciles d'emploi comme des brosses à dents qui contrôlent la présence de microbes buccaux.

L'avenir de la génétique est déjà en train de se concrétiser dans certains domaines. D'autres développements se feront attendre plus longtemps et pourraient prendre une forme inattendue. Mais comme le souligne Andrew Hessel, nous pouvons être assurés d'une chose : les technologies de l'ADN deviendront meilleur marché, plus performantes et plus rapides. Parce qu'elles nous permettront de concevoir des formes de vie artificielles, elles sont d'une importance cruciale. « L'utilisation et les progrès rapides de ces technologies sont inévitables, ajoute-t-il. Nous ne pourrions pas les arrêter même si nous le voulions. Exactement comme pour les ordinateurs. »

6 Biologie de synthèse

Adam Rutherford

J'imagine que vous êtes d'accord : 314 dollars pour une cravate, c'est cher payé. Cependant celle dont je vous parle est tissée avec de la soie d'araignée – une bizarrerie certes mais qui pourrait plus ou moins justifier son prix. La soie d'araignée est un matériau remarquable : cette protéine revêt une multitude de formes selon les espèces et l'utilisation – tisser une toile, emmailloter une proie ou protéger des œufs. Chacune de ces variétés possède des propriétés mécaniques, élastiques et physiques qui surpassent ce que l'homme peut fabriquer aujourd'hui. À poids égal les soies auxquelles se suspendent les araignées sont plus résistantes que l'acier. Toutes les variétés sortent de l'abdomen de l'animal par l'une de ses nombreuses filières – un réseau complexe de vannes internes qui assemblent de courtes fibres de protéine en fonction du type de soie désiré.

Nous aurions de bonnes raisons de récolter la soie d'araignée et d'exploiter ses exceptionnelles propriétés physiques. Mais ces animaux sont notoirement rétifs à l'élevage. La plupart présentent des traits de caractère peu compatibles avec les procédés d'agriculture nécessaires à une production de masse : les araignées sont des êtres essentiellement solitaires qui tendent au cannibalisme en compagnie de leurs congénères. C'est la seconde raison du coût de notre cravate : elle est tissée avec de la vraie soie d'araignée

mais elle n'a jamais vu d'arachnide ou de filières, de près ou de loin. Les fibres ont poussé et fermenté dans de la levure.

Bienvenue dans le monde étrange de la biologie de synthèse. Bien sûr ce titre est un oxymore : la biologie, c'est la nature, laquelle ne saurait être synthétique. Ce paradoxe réside au centre d'une technologie qui va profondément influencer – voire dominer – non seulement notre avenir vestimentaire, mais aussi la médecine, l'agriculture, la conception de médicaments, la production d'énergie et même l'exploration spatiale. Notre cravate est le premier article de l'entreprise de biologie synthétique Bolt Threads. Il s'agit en quelque sorte d'un jalon symbolique plus que d'un produit commercialisable à grande échelle – seules cinquante cravates en soie d'araignée ont été manufacturées et, malgré leur bleu très chic, elles sont bigrement chères. Bolt Threads a pour ambition de produire des textiles destinés aux vêtements, mais en contournant les méthodes traditionnelles de culture et de récolte du coton, de la laine ou de la soie à partir d'organismes peu performants comme les plantes et les animaux. Nous avons « conçu » ces organismes pendant plus de 10 000 ans afin qu'ils produisent des biens à notre usage. Mais l'agriculture est depuis toujours entravée par le long et laborieux processus de la reproduction sexuée. Elle est surtout limitée par la nécessité biologique de pratiquer cette reproduction presque exclusivement au sein d'une même espèce. Avec la biologie de synthèse nous pouvons désormais escamoter les étapes du sexe et de l'élevage. Nous pouvons fusionner des organismes qui n'auraient pas la moindre possibilité de copuler ensemble, séparés dans l'arbre de l'évolution depuis des centaines de millions d'années – par exemple les araignées et les levures. On cherche ainsi à extraire un

code source et à le réorganiser en des usines biologiques bien plus efficaces.

Dans la nature ce code source est l'ADN. La protéine de soie d'araignée est encodée dans des gènes, qui ont résidé exclusivement dans ces animaux pendant quelques centaines de millions d'années. Il y a quelques décennies nous avons commencé à extraire et caractériser les gènes avec précision et rapidité. Nous nous sommes demandé comment réinsérer ces gènes dans d'autres organismes, qu'ils soient d'une même espèce ou d'une autre radicalement différente. On peut laisser ces gènes intacts pour examiner leur comportement ; on peut les modifier et même les détériorer volontairement afin de tester leurs fonctions essentielles et d'observer ce qui se passe quand une partie est cassée. C'est de l'ingénierie génétique rendue possible par l'universalité du code source biologique : tous les organismes sur Terre appartiennent au même arbre généalogique, un réseau tentaculaire qui selon Charles Darwin et sa théorie de l'évolution s'est étendu et épanoui pendant près de 4 milliards d'années. Cela signifie que toutes les créatures sont encodées par de l'ADN. Cet alphabet d'une simplicité trompeuse ne comprend que quatre lettres chimiques qui se combinent pour former le langage dans lequel sont écrits les gènes. Ce langage des gènes est traduit en mots : les acides aminés. L'ensemble du vivant n'utilise que vingt et un acides aminés qui s'assemblent en protéines. C'est ainsi qu'ont été composées toutes les protéines existantes. Et la vie est entièrement faite de, ou par des protéines.

À la naissance de l'ingénierie génétique, au milieu des années 70, on a compris que si l'on s'y prenait convenablement, la

cellule ou l'organisme hôte n'accordait pas d'importance à l'origine de l'ADN tant qu'il pouvait être lu. Les gènes qui contenaient les instructions pour fabriquer et diriger les protéines au sein d'une même espèce pouvaient désormais être inscrits dans l'ADN d'organismes totalement différents.

Quelques années plus tôt les Beatles avaient inventé l'échantillonnage musical. Pour l'enregistrement de « Being for the Benefit of Mr. Kite ! » de l'album *Sgt Pepper's Lonely Hearts Club Band* (1967), George Martin et Paul McCartney s'étaient saisis d'un enregistrement sur bande d'une Calliope – un instrument de cirque de l'époque victorienne. Ils ont découpé la bande en petits morceaux. La légende veut qu'ils les aient jetés en l'air, ramassés au sol aléatoirement et insérés dans leur morceau. Les notes étaient écrites dans la même langue. En ajustant soigneusement la clé et le tempo, les transitions de la chanson contenaient pour la première fois dans l'histoire des parties physiquement extraites d'un autre enregistrement, parfaitement insérées pour compléter le morceau. Dès lors le *sampling* est devenu une technique universelle dans la musique populaire. Il a donné naissance à des genres entiers, notamment le hip-hop qui est à ce jour la forme musicale la plus lucrative de tous les temps.

En 1973 à l'université de Stanford, le scientifique Paul Berg et son équipe parvinrent à transplanter un gène d'un virus dans un autre. Ce *sampling* biologique peut être considéré comme l'acte de naissance de la biologie moderne. Il inaugure une biotechnologie qui allait dominer toutes les autres. Il n'existe aujourd'hui aucun domaine des sciences de la vie qui n'ait recours à ces techniques. On pense à l'identification de gènes défectueux à l'origine de

maladies, ou plus tard à l'identification de *tous* nos gènes dans le Projet Génome Humain. Ces projets dépendaient entièrement de notre capacité à extraire et insérer des gènes dans des bactéries où ils pouvaient être manipulés, décrits et compris. Mon propre domaine de recherche – la génétique du développement – repose sur cette même possibilité : prendre les gènes d'un organisme et les insérer dans un autre, mieux compris ou qui se prête mieux à l'observation. Nous avons ainsi extrait des gènes humains que nous avons introduits dans des bactéries, trafiqué le code, et épissé le résultat dans des souris. Quelques décennies après les années 80, le *remixing* biologique est devenu une pratique courante.

Au tournant du siècle, les domaines de la génétique, de l'ingénierie génétique et de la biologie moléculaire sont passés de l'enfance à l'adolescence. Le Projet Génome Humain bouillonnait en arrière-plan, l'époque était fébrile et excitante comme j'imagine le sont tous les domaines de recherche, quand on se trouve en pleine révolution. Mais rétrospectivement, nous étions lents et inefficaces. Nous devions réinventer à chaque fois les nombreuses manipulations de l'ADN sur lesquelles reposaient nos expériences. À chaque *sampling*, nous coupions des enregistrements de Calliope. C'était un monde où l'échantillonnage n'existait que sur mesure.

C'est à peu près l'histoire de toutes les nouvelles technologies. On les invente dans le désordre de l'expérimentation. On les affine, on les copie et on les distribue pour que chacun puisse les utiliser. Rapidement elles deviennent plus accessibles et, pour ainsi dire normales. L'échantillonnage musical est aujourd'hui un jeu d'enfant – on peut en faire sur un téléphone portable. J'écris ces mots sur une machine inconcevable il y a seulement cinquante ans, une machine

d'une grande fiabilité dont je comprends à peine la technologie, qui repose sur les principes simples de l'électronique et sur les propriétés des matériaux. En frappant sur mon clavier je génère des tensions électriques dans des fils, des circuits, des portes logiques et des transistors ; au final des diodes électroluminescentes s'enclenchent ou s'éteignent sur l'écran pour former les lettres désirées. Le processus est si sophistiqué qu'il m'est impossible de le comprendre vraiment. C'est la standardisation des composants qui a permis le boom de l'électronique. Vous ne deviez pas réinventer la diode chaque fois que vous aviez besoin d'une diode : vous n'aviez qu'à en acheter une et la combiner à d'autres composants en sachant parfaitement ce qui allait se passer.

Les composants sont devenus de plus en plus miniaturisés, et la réalisation de circuits électroniques toujours plus complexes s'est simplifiée de jour en jour. De nos jours l'électronique et les transistors sont présents dans pratiquement tous les secteurs de la vie quotidienne.

Les fondateurs de la biologie de synthèse en avaient conscience. Vivant principalement aux États-Unis, à Stanford et au MIT, ces ingénieurs électroniciens et ces mathématiciens savaient que la génétique se résumait à des circuits codifiés qui pouvaient être écrits et réécrits, mais que les généticiens passaient la moitié de leur temps à les réinventer. Si l'on parvenait à standardiser les composants de l'ingénierie génétique à l'instar des composants électroniques, on verrait alors une croissance exponentielle de nos progrès en matière d'usines biologiques.

C'est donc ce qu'ils firent. La fondation BioBricks a été créée en 2006 comme un dépôt ouvert de composants ADN standard

subtilement modifiés pour s'organiser et s'assembler comme des Legos. Il ne s'agit pas d'une métaphore : on a extrait les gènes et les interrupteurs génétiques sous forme de chaînes d'ADN et modifié leurs extrémités afin qu'elles s'emboîtent avec d'autres composants dans une orientation biologiquement correcte. Vous pouvez commander ces éléments à la Fondation qui les envoie partout dans le monde, sur du papier buvard. Il vous suffit de l'humecter : l'élément d'ADN se détachera en suspension et se liera au composant suivant comme un domino. Avec cette simple opération vous accomplissez une prouesse d'ingénierie génétique difficilement imaginable dans la plus grande partie de notre Histoire, et même dans l'Histoire de la science moderne.

Si doués qu'ils soient pour prédire les technologies du futur, aucun de nos grands auteurs de science-fiction n'a anticipé ces changements. Avec ses 4 milliards d'années d'erreurs et d'essais, l'évolution nous a fourni une ressource inimaginable pour construire de nouvelles formes de vie : des gènes de formes innombrables ajustés pour optimiser leur propre survie aux changements de l'environnement dans l'organisme hôte. Avec la biologie de synthèse nous avons inventé un système où ces composants – ces morceaux de l'évolution – sont modifiés pour assurer non pas la survie de l'hôte mais nos propres besoins.

La biologie de synthèse prend plusieurs formes. Certains chercheurs ne se contentent pas de réécrire le code dans tel ou tel dessein : ils réinventent le langage de l'ADN en introduisant des lettres inconnues dans la nature ou des versions modifiées de l'ADN qui n'ont jamais existé. D'autres utilisent l'ADN comme support de mémoire – après tout c'est ce même rôle qu'il joue pour la vie. Les

gènes sont de l'information et l'ADN est un format de données remarquablement stable : nous pouvons récupérer les génomes de gens ou d'organismes morts depuis des dizaines ou même des centaines de milliers d'années. De plus, comme c'est de l'ADN, nous ne cesserons jamais de l'étudier. Dans le monde des appareils numériques, les données se dégradent et les formats tombent en désuétude après quelques années seulement. Vous souvenez-vous des disquettes de 5 pouces $\frac{1}{4}$ ou des cassettes vidéo Betamax ? Plusieurs équipes dans le monde sont parvenues à encoder de la vidéo, des sonnets de Shakespeare, des livres et autres données numériques dans de l'ADN. C'est à ce jour le plus dense des supports connus – plus dense qu'un disque Blu-Ray de plusieurs ordres de grandeur. Actuellement l'ADN offre de faibles débits en lecture et en écriture. Comme support de mémoire il n'a d'intérêt que pour l'archivage à long terme. Mais à l'avenir nous aurons peut-être des disques durs à ADN dans nos ordinateurs.

Une profusion de nouvelles idées et un potentiel sans précédent d'innovations futures ont germé durant les premières décennies qui ont suivi la naissance de la biologie de synthèse. Cette diversité d'idées et de techniques est surprenante mais l'objectif principal reste le même : concevoir des circuits génétiques capables de fabriquer des produits souvent difficiles ou impossibles à fabriquer autrement.

L'un des chapitres les plus notables du développement de la biologie synthétique concerne le traitement de la première cause de mortalité mondiale : la malaria. Chaque année on compte entre 200 et 500 millions de nouvelles infections dans le monde et environ 400 000 décès, principalement des enfants de moins 15 ans. Dans

l'histoire de l'humanité ce fléau a fauché plus de vies que n'importe quelle autre cause unique. Certains traitements ont apporté un répit temporaire, mais leur emploi sans discernement a favorisé chez le protozoaire *Plasmodium* l'apparition de résistances et d'immunités aux médicaments disponibles. Récemment une nouvelle substance active, l'artémisinine, s'est imposée comme traitement de choix. Traditionnellement, on extrait cette substance de l'armoise annuelle de Chine. Mais comme pour beaucoup de produits agricoles, l'offre et la demande sont instables et son prix a connu de vastes fluctuations. Au début de notre millénaire, Amyris, une entreprise de biologie de synthèse de San Francisco, travaillait au développement d'une forme de carburant diesel qu'on pouvait produire avec de la levure. Parmi les sous-produits de cette synthèse tortueuse, l'un des chercheurs avait identifié un précurseur de l'artémisinine. Les scientifiques ont donc optimisé leurs circuits génétiques pour produire de plus grandes quantités d'artémisinine dans leurs cellules de levure. Ils avaient découvert une nouvelle source pour ce médicament. La fondation Bill et Melinda Gates a reconnu dans ces travaux une stratégie potentielle pour que le traitement de la malaria soit disponible à grande échelle, sans les contraintes économiques de l'agriculture traditionnelle. Elle a injecté de nombreux millions de dollars dans le projet et cédé une licence à l'entreprise pharmaceutique Sanofi pour commercialiser le médicament à un prix significativement plus bas.

L'utilisation des cellules comme capteurs est un objectif poursuivi depuis les toutes premières années de la biologie de synthèse. La machinerie de la vie peut être incroyablement sensible – après tout les photorécepteurs de votre rétine sont capables de

détecter un unique photon de lumière. Aujourd'hui des cellules ont été reprogrammées pour détecter une multitude de signaux environnementaux, depuis la viande périmée dans les barquettes de supermarché jusqu'à la détection de polluants pétrochimiques ou d'agents infectieux dans le corps.

La biologie de synthèse ne se limite pas à notre planète Terre. La NASA a manifesté un intérêt particulier et a investi dans le développement de technologies dérivées de la reprogrammation de l'ADN, principalement parce que les cellules sont petites et ne pèsent presque rien. Dans l'exploration spatiale, c'est le poids qui est la première source de coûts. Selon certaines estimations, il en coûte environ 30 000 dollars pour se libérer de la gravité et envoyer un seul petit kilogramme de la Terre vers l'Espace. Si nous voulons vraiment envoyer des gens sur d'autres planètes, nous allons devoir surmonter deux obstacles majeurs. Le premier réside dans la dureté de l'environnement spatial – nous n'avons pas évolué pour survivre en dehors du cocon protecteur de l'atmosphère terrestre. Or les véhicules spatiaux baigneront dans des rayons cosmiques et des éruptions solaires qui infligeront une quantité de radiation équivalente à une vie entière d'exposition normale ; une simulation d'aller-retour vers Mars a montré que les astronautes souffriraient de stérilité et de cataracte, en plus d'un risque accru de développer des tumeurs cancéreuses. La meilleure protection contre ces rayons mortels consisterait en un blindage métallique extrêmement massif dont les coûts seraient prohibitifs. À Ames, en Californie, les chercheurs de la NASA se sont demandé comment la biologie de synthèse pourrait neutraliser ces effets. Ils travaillent sur des bactéries qui sécrètent des cytokines quand elles sont exposées aux

radiations. Les cytokines sont la réponse naturelle du corps aux dégâts que les radiations causent à l'ADN. Une bactérie synthétique capable de fabriquer ses propres cytokines, pourrait contrecarrer les dommages.

Une seconde raison de l'intérêt de la NASA est qu'une fois les astronautes sur une autre planète, ils auront besoin d'un abri, d'oxygène et de nourriture. Divers projets ont impliqué des éléments de BioBricks pour créer des circuits cellulaires capables de produire de l'oxygène, de la nourriture et même des briques de construction – le circuit sécrète une sorte de ciment moléculaire qui pousse dans du sable comparable au régolithe martien en formant des briques. Les trois éléments requis sont des cellules dans une éprouvette, de l'eau et du sable martien. Un seul devrait être apporté depuis la Terre.

Cette créativité se nourrit de l'enthousiasme suscité par les promesses et les rêves de la biologie de synthèse. C'est une discipline bouillonnante à l'exubérance juvénile. N'importe qui peut concevoir des circuits génétiques – les seules limites sont celles de votre imagination. Pendant longtemps le problème était que trop peu de ces rêves aboutissaient. Les circuits dessinés sur papier ne fonctionnaient pas toujours comme prévu une fois implantés à l'intérieur d'une cellule vivante. Ce qui devait correspondre à des résultats numériques clairs se noyait dans le bruit du système. Que ce soient des capteurs chimiques, des médicaments ou des carburants, les résultats sont peu convaincants. Il faudra encore des dizaines d'années avant que ne soient utilisables les dispositifs de protection des astronautes. Le biodiesel propre d'Amyris s'est avéré inadapté à l'échelle industrielle : l'entreprise n'a pas même approché

des volumes de production commercialement viables. L'artémisinine est sur le point d'arriver sur le marché depuis quelques années, mais on l'attend encore. Par contre on la trouve sur le marché noir et le parasite montre de premiers signes de résistance parce que les utilisateurs ne suivent pas les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé selon lesquelles l'artémisinine ne devrait être utilisée qu'en combinaison avec d'autres thérapies.

Néanmoins les promesses de la biologie de synthèse sont réelles. Quand elle a émergé durant la première décennie du 21^e siècle, elle soulevait un enthousiasme presque palpable ; le battage médiatique et les conversations allaient bon train. Mais comme tant d'autres technologies émergentes, elle n'a pas tenu ses promesses. Mon sentiment est que nous sommes passés de cette phase de battage à une ère plus réaliste, et que nous verrons prochainement de vrais produits fonctionnels issus de la biologie de synthèse. Des produits qui apportent des solutions concrètes aux problèmes de notre monde. L'ADN a été redessiné en software – ou plutôt devrions-nous dire en « wetware ». En même temps qu'ils programment l'ADN, les ingénieurs en wetware corrigent les bugs de produits qui seront bientôt commercialisés. La cravate de Bolt Threads n'est qu'un gadget précurseur d'une technologie qui changera profondément la façon dont nous fabriquons toutes sortes de choses. En science, les révolutions vont lentement et par paliers. Pendant des dizaines de milliers d'années, nous avons cultivé, récolté et amélioré les matériaux avec lesquels nous construisons notre monde. Bientôt ces matériaux pousseront à l'intérieur de cellules vivantes dont nous aurons reprogrammé les circuits – la nature *remixée* en quelque sorte.

7 Transhumanisme

Mark Walker

Les transhumanistes pensent que nous devrions améliorer radicalement l'être humain en utilisant les technologies de pointe de la pharmacologie, de l'ingénierie génétique, de la cybernétique et des nanotechnologies. En d'autres termes, nous devrions essayer de créer de nouveaux types d'humains améliorés par rapport à nous – ce qu'ils appellent parfois des « post-humains ». Imaginez un monde futur habité par une nouvelle espèce de post-humains beaucoup plus heureux, vertueux et intelligents, dont les vies se mesureraient en siècles et non plus en décennies. C'est l'avenir que les transhumanistes imaginent et auquel ils travaillent.

L'amélioration radicale du bonheur

Nous savons que le bonheur est important. Nous comprenons parfaitement pourquoi certains renoncent à la célébrité, au pouvoir ou à l'argent s'ils pensent que ces choses-là les rendraient moins heureux, et pourquoi les parents disent souvent ne vouloir que le bonheur de leurs enfants.

Puisque le transhumanisme poursuit l'objectif d'une vie meilleure, on ne sera pas surpris que ses adeptes préconisent l'utilisation de la science et la technologie pour améliorer radicalement notre bonheur.

Nous savons maintenant que les composantes génétiques du bonheur (défini comme des émotions positives et la satisfaction globale par rapport à sa propre vie) sont presque aussi importantes que celles qui gouvernent notre taille par exemple. Bien sûr nous devons interpréter avec précaution l'idée de « composante génétique du bonheur » : les gènes ne correspondent pas à la destinée. La plupart des caractéristiques humaines résultent d'une combinaison de facteurs génétiques et environnementaux. Cependant, nous connaissons tous des personnes plus heureuses que la plupart. Elles semblent avoir plus d'allant dans leur démarche ou rebondissent plus rapidement après un sérieux revers. Ces « heureux géants » sont les détenteurs de « gènes du bonheur » – des séquences de gènes corrélées avec une disposition au bonheur que les scientifiques ont déjà identifiées et localisées. Avec le progrès de la biologie et grâce à l'ingénierie génétique, il sera possible d'engendrer des personnes plus heureuses que l'être humain moyen d'aujourd'hui. Le fait est que nous disposons déjà de technologies à même de concevoir de tels descendants. La création d'un bébé-éprouvette implique souvent que l'embryon, généré en laboratoire, passe certains examens avant d'être implanté dans la mère. Les techniciens testent généralement la présence de marqueurs génétiques pour certaines maladies, parfois le sexe de l'enfant. Mais en principe il serait possible d'examiner l'embryon et de le sélectionner en fonction de marqueurs génétiques de la prédisposition au bonheur.

Mais il n'est pas nécessaire d'attendre l'ingénierie génétique pour instituer une nouvelle norme d'« heureux géants ». Ceux qui n'ont pas été génétiquement modifiés pourraient également voir leur

condition s'améliorer. Je pense à une « pilule des gens heureux » composée de principes actifs qui optimisent le bonheur. Ces cachets seraient à la disposition de la grande majorité d'entre nous qui n'ont pas gagné à la loterie du bonheur. Contrairement aux agents pharmacologiques actuels comme le Valium ou l'ecstasy, ces pilules offriraient l'expérience naturelle du bonheur sans altération de nos facultés cognitives. Si la société se décidait à faire un effort dans cette direction, les chances seraient grandes que nous parvenions à créer de telles pilules dans les dix ans. Un tel projet coûterait environ un milliard de dollars par an pendant une décennie. Une somme modeste en comparaison de la taille de l'économie globale. Mais les bénéfices quant à eux seraient gigantesques. Nous aborderions tous la vie d'un pas plus enjoué, celui dont les plus heureux d'entre nous vont déjà. Il y aurait des retombées incroyables. Les gens heureux ont tendance à se montrer plus sociaux, à être de meilleurs amis, à décrocher des notes plus élevées à l'école, à mieux réussir leur mariage, à être évalués plus positivement par leurs collègues de travail et leurs patrons... et ainsi de suite.

L'amélioration radicale de la vertu

Des efforts énormes sont consacrés à rendre les êtres humains plus moraux. Notre enfance est jalonnée d'innombrables leçons : ne pas frapper autrui, ne pas mentir, se comporter en bon camarade, partager. Nous éduquons aussi les adultes aux prérequis de la moralité. Par exemple les institutions publiques lancent des programmes de sensibilisation contre le fléau du racisme ou des

rock stars dirigent notre attention vers les souffrances des plus défavorisés.

Inspirés par les aspects génétiques de la vertu et la question de notre amélioration morale, certains transhumanistes suggèrent qu'aux efforts environnementaux vers une plus haute moralité devraient correspondre des efforts biologiques. Leur proposition repose sur deux idées fondamentales. D'une part les comportements et les traits de caractère humains ont une composante génétique. D'autre part la moralité résulte de ces comportements et de ces traits de caractère.

Parmi ceux que nous avons étudiés, tous les aspects de notre personnalité ou de notre comportement semblent avoir une composante génétique. Nous pouvons sans risque prédire que les comportements vertueux ont eux aussi une telle composante. En fait il serait extrêmement surprenant que ce ne soit pas le cas. Nous pouvons même voir des éléments de vertu morale à l'œuvre chez d'autres espèces : une maman souris prend soin de ses petits et les grands singes partagent parfois leur nourriture d'une manière qu'on ne peut décrire que comme juste.

L'idée de « la vertu génétique » est d'équiper nos descendants avec plus d'éléments biologiques qui favorisent la vertu et de minimiser ceux qui encouragent le vice. Comme pour le bonheur, ces modifications pourraient résulter de l'ingénierie génétique, de la sélection des embryons ou d'une nouvelle pharmacologie. Cependant la mise en garde contre le déterminisme génétique s'applique également dans ce cas : si nous créons des descendants porteurs de gènes corrélés avec un comportement plus vertueux, cela ne garantit pas qu'ils soient effectivement plus vertueux. Au

mieux, ces manipulations pourraient augmenter la *probabilité* d'un comportement plus moral. Les gènes ne sont pas la destinée.

L'allongement radical de la durée de vie

L'allongement radical de l'espérance de vie est une aspiration probablement aussi vieille que l'humanité elle-même. Pourtant nous avons accompli peu de progrès dans ce sens. À l'heure où ces lignes sont écrites, la Française Jeanne Calment détient toujours le record de longévité humaine avec 122 ans (1875-1997). La science médicale n'a pas été capable de faire grand-chose pour la longévité *maximale* : nous disposons de preuves solides qu'un certain nombre d'individus ont dépassé les 100 ans au cours de l'Histoire. En revanche elle a fait beaucoup pour élever la durée de vie *moyenne* des êtres humains, principalement par la réduction de la mortalité infantile.

L'allongement radical de la durée de vie repose sur cette idée : utiliser la science et la technologie pour repousser cette limite biologique d'à peine plus de 100 ans, et permettre aux humains (ou post-humains) de vivre des centaines voire des milliers d'années. Une manière de réaliser cet objectif pourrait se comparer à la stratégie de mon voisin qui maintient sa vieille camionnette en état de marche : remplacer simplement les pièces usées. Alors que la durée de vie moyenne d'une automobile est d'environ huit ans, ce voisin possède une camionnette comme neuve, mais cinq fois plus vieille. En théorie il sera possible de maintenir un corps humain en vie indéfiniment pourvu que nous réparions et remplaçons ses cellules et organes, par exemple en employant la technologie des

cellules-souches. En utilisant les propres cellules-souches d'un patient, les scientifiques ont déjà démontré qu'il était possible de faire pousser en laboratoire un nouvel organe, comme une vessie. Il s'agit d'un simple « couper-coller ». Par exemple on retire une ancienne vessie pour la remplacer par un nouvel organe cultivé en laboratoire. Cette méthode pourrait même ne pas être nécessaire : lors d'essais cliniques, on a utilisé des cellules-souches pour réparer des muscles cardiaques endommagés par un infarctus.

Dans le combat contre la mort et le vieillissement, une partie des difficultés provient du nombre de causes impliquées. La fondation SENS est une organisation à but non lucratif qui se consacre au progrès vers un allongement radical de la durée de vie. Elle a identifié sept raisons au vieillissement cellulaire (l'atrophie cellulaire, les cellules cancéreuses, les mutations mitochondriales, les cellules résistantes à l'apoptose, le durcissement de la matrice extra-cellulaire, les agrégats extra-cellulaires, et les agrégats intracellulaires). Chaque cause exigera la mise au point d'une solution biomédicale spécifique. Nous progressons néanmoins, comme l'ont démontré des techniques remarquables pour allonger la durée de vie d'animaux. Ce fait suggère que la science et la technologie nous permettront d'étendre radicalement notre espérance de vie. Récemment des chercheurs ont pu faire vivre des souris 25% plus longtemps simplement en développant un « interrupteur » cellulaire qui élimine une certaine catégorie de cellules âgées (les cellules sénescents). Non seulement les rongeurs ont une plus longue vie, mais elles sont en meilleure santé et présentent moins de pathologies liées au vieillissement.

Aucune technologie connue ne pourra nous aider en cas de blessure mortelle : les procédés à base de cellules-souches ne pourront rien pour vous si un piano vous tombe sur la tête du troisième étage. Mais même en de telles circonstances, les transhumanistes ont imaginé des technologies réparatrices qui – bien que futuristes – pourraient devenir réalité avant la fin du 21^e siècle. L'idée serait d'opérer une sauvegarde. On pourrait par exemple scanner et consigner votre cerveau jusque dans ses moindres détails, et le reconstruire à partir de ces données. L'une des propositions consiste en une petite armée de nanobots – des robots à l'échelle nanométrique – qui enregistrent la structure moléculaire de votre cortex. Dans le cas d'une blessure traumatique, les nanobots pourraient être activés pour réparer le cerveau écrasé par un piano, ou pour en créer un nouveau à partir de la sauvegarde.

Une autre possibilité serait de télécharger les informations de votre cerveau vers une plateforme informatique. Cela reviendrait en somme à transférer votre esprit de son « wetware » biologique (le cerveau) vers le hardware d'un ordinateur. Cela soulève de nombreuses et épineuses questions métaphysiques. Par exemple, serait-ce réellement « vous » qui seriez conservé dans cette migration, ou serait-ce simplement un exercice de copie ? Les transhumanistes et les philosophes sont profondément divisés sur cette question. Pour ma part, je me range aux côtés de ceux qui disent que nous *pouvons* survivre à une telle migration. Je vais même jusqu'à affirmer qu'il pourrait exister de multiples versions de soi : si vous survivez au transfert d'une plateforme biologique vers une plateforme informatique, rien n'empêche en principe que vous

soyez copié sur de nombreux autres ordinateurs. De cette manière nous atteindrions l'immortalité ou quelque chose qui s'en rapproche.

L'amélioration radicale de l'intelligence

Il existe une corrélation bien connue entre la taille du cerveau et l'intelligence (à vrai dire, pour beaucoup d'espèces, il faut aussi prendre en compte le poids du corps, mais nous vous passerons ce détail). Notre cerveau est presque trois fois plus gros que celui du chimpanzé, bien que nous soyons génétiquement très similaires – entre 96% et 98% de notre génome est identique. Étant donné que l'humain compte environ 20 000 gènes, cela veut dire que moins de 1000 d'entre eux nous séparent de nos cousins, peut-être même moins de 400. En utilisant les technologies génétiques, nous pourrions essayer de créer une espèce post-humaine. Appelons cette espèce *Homo Grossetetus* : il aurait un cerveau deux ou trois fois plus gros que celui des êtres humains actuels. Du point de vue technologique, c'est relativement simple. Il existe des gènes particuliers dits « homéotiques » qui déterminent la taille de différentes parties du corps. Théoriquement il serait possible de créer des êtres avec des cerveaux beaucoup plus gros en accroissant l'expression des gènes qui contrôlent sa taille au cours du développement du zygote. Avec différentes combinaisons de gènes homéotiques, nous pourrions augmenter la croissance de certaines parties du cerveau. Le néocortex est par exemple associé aux fonctions cognitives supérieures. Si l'objectif est d'augmenter l'intelligence, il serait logique d'essayer de faire grossir cette région

en manipulant les gènes homéotiques qui en contrôlent le développement.

Mais le fait que nous *pourrions* tenter cette expérience n'implique pas que nous *devrions le faire*. Nous ne savons pas si de telles méthodes conduiraient à une intelligence post-humaine, à des créatures dont le QI serait au nôtre ce que notre intelligence est à celle des chimpanzés. Nous n'avons pas non plus de bonnes raisons de penser que ces expériences échoueraient. C'est pourquoi les scientifiques expérimentent : ils veulent des réponses. Mais lorsqu'aujourd'hui nous appliquons les technologies génétiques aux plantes, la plupart des expériences tournent mal. C'est une chose de jeter au compost des plantes expérimentales ratées, c'en est une autre de le faire avec des zygotes humains ou des nourrissons. Il n'empêche nous disposons déjà de la science et de la technologie : nous pourrions démarrer aujourd'hui un programme d'expérimentations afin de créer *Homo Grossetetus*. Fort heureusement, très peu de scientifiques sont prêts à se lancer dans un tel projet et à fermer les yeux sur les considérations morales, sécuritaires et éthiques. De telles recherches controversées devront être discutées et évaluées soigneusement par l'ensemble de la société, si nous ne voulons pas qu'elles soient rapportées à des idéologies discréditées comme celle du mouvement eugéniste.

Il existe des moyens moins spectaculaires pour stimuler nos facultés cognitives. D'après certains travaux, jusqu'à un tiers des étudiants en premier cycle universitaire utilisent la pharmacologie – des psychostimulants comme le modafinil ou l'adderall – pour améliorer leurs performances scolaires. De premières expériences ont également eu lieu dans le domaine de la « cyborgisation » de

l'esprit humain, en fabriquant des interfaces cerveau-ordinateur. Enfin nous pourrions peut-être accroître les capacités du cerveau humain adulte tout simplement en créant beaucoup de nouvelles cellules cérébrales avec des techniques de néogenèse. (À l'âge adulte, les cerveaux humains tendent à ne plus fabriquer qu'un nombre relativement restreint de nouvelles cellules.) Menées sur des patients atteints d'Alzheimer, des expériences nous ont appris que les tissus neuronaux fœtaux peuvent s'intégrer aux tissus adultes et fonctionner correctement. Cette technique offre donc une autre voie potentielle vers *Homo Grossetetus*. Pour savoir s'il est possible d'améliorer radicalement l'intelligence, nous pourrions ajouter en continu de nouvelles cellules cérébrales à des sujets (tout en augmentant le volume de leur boîte crânienne).

Les raisons du transhumanisme

En réfléchissant aux motifs du transhumanisme, nous nous demandons s'il est moralement souhaitable, et non s'il a une haute probabilité de devenir réalité. Ce chapitre développe un point de vue moral sur l'avenir : comment l'avenir *devrait* se réaliser plutôt que comment il se réalisera.

Si les transhumanistes considèrent les améliorations radicales comme un objectif moral, ils ne pensent pas que tous – en particulier ceux opposés au trans-humanisme – devraient être radicalement améliorés. Par exemple, songez que décrocher un diplôme est un objectif valable : cela ne veut pas dire que tout le monde devrait être contraint d'aller à l'université. Non seulement cela violerait les libertés individuelles, mais ce serait sans doute contre-productif. Les

transhumanistes croient généralement qu'il est mal de forcer des adultes à quoi que ce soit, quand bien même nous pensons que ce serait bon pour eux.

Cette vision anti-paternaliste revêt un autre aspect : les transhumanistes défendent l'idée d'un « droit à la liberté biologique ». Il s'agit déjà d'une liberté reconnue, jusqu'à un certain point : nous autorisons les citoyens à modifier leur biologie avec des lasers ophtalmiques et toutes sortes de chirurgies esthétiques, comme les implantations mammaires. Les transhumanistes maintiennent une position selon laquelle les améliorations radicales sont ou devraient être comprises dans le droit fondamental de faire ce que l'on veut de son propre corps. De fait nous constatons une continuité intime entre la liberté de conscience reconnue par tant d'États libéraux modernes, et la liberté biologique. Restreindre l'accès à l'amélioration radicale de l'intelligence ou du bonheur revient à brider la conscience, en réduisant nos états de bonheur ou en nous imposant une pensée plus limitée.

Les transhumanistes font souvent appel à l'analogie entre amélioration biologique et élévation culturelle. Souvenez-vous qu'il n'y a que quelques milliers d'années que nous avons inventé des formes efficaces d'écriture qui permettent de consigner de l'information par écrit. En créant des espaces de stockage en dehors de notre cerveau, l'écriture a augmenté de manière spectaculaire nos capacités intellectuelles et notre aptitude à nous rappeler les informations. Nous tendons à considérer cette amélioration culturelle comme une excellente chose et – ainsi se conclut l'analogie – nous devrions penser la même chose de son pendant biologique.

Beaucoup d'arguments transhumanistes se focalisent sur les retombées positives de certains types d'amélioration. Le droit ou le devoir d'augmenter le bonheur sont liés à sa désirabilité. Le droit – voire le devoir – d'améliorer les comportements moraux est lié à l'idée d'une vie et d'un monde meilleur. L'augmentation de l'intelligence est liée à la volonté de découvrir la vérité sur l'univers et d'y comprendre notre place. L'allongement de notre durée de vie est lié à l'aspiration à une existence bien remplie et satisfaisante.

Les arguments contre le transhumanisme

Jusque vers la fin des années 90, les objections au transhumanisme avaient tendance à se focaliser sur la très faible probabilité de son avènement plutôt que sur sa désirabilité. L'idée que la technologie pourrait servir à améliorer radicalement les êtres humains était critiquée (et souvent même tournée en ridicule) comme relevant de la science-fiction. En 1996, après la naissance du premier mammifère cloné – la brebis Dolly – le vent a commencé de tourner. Les critiques ont admis à contrecœur que certaines de ses propositions étaient techniquement faisables. Ils ont déporté leurs réquisitoires sur la question de sa désirabilité ou de son caractère éthique.

Leon Kass, l'ancien président du Conseil de Bioéthique du président des États-Unis, a exprimé l'idée que le transhumanisme était une forme d'hybris autodestructrice. Selon lui, les efforts et les sacrifices sont inextricablement mêlés à nombre de nos désirs et de nos buts les plus profonds. Avec le transhumanisme, on se demande comment la technologie atteindra ces objectifs, au lieu de

réfléchir aux efforts nécessaires. Quand Ferdinand Magellan accomplissait la première (quasi) circumnavigation du globe, entre 1519 et 1522, cela représentait un admirable triomphe de l'esprit humain. Aujourd'hui on peut emprunter la route de Magellan en achetant des billets d'avion. Mais on ne décrira que difficilement un tel voyage aérien comme relevant d'un exploit de notre esprit. Cependant la force de l'objection de Kass dépend du crédit que l'on accorde à cette idée : nous ne trouverions plus de nouveaux défis à relever une fois notre biologie radicalement améliorée.

Francis Fukuyama s'inquiète que les transhumanistes puissent détruire les fondements de l'égalité sur lesquels repose la vie politique moderne : nous partageons une même nature humaine, laquelle forme le socle de la stabilité et de la légitimité politiques. Fukuyama a posé cette célèbre question rhétorique : « Qu'advient-il aux droits civiques le jour où nous aurons pratiquement créé des gens avec une selle sur le dos, et d'autres chaussés de bottes et d'éperons ? » En réponse à cette question nous pourrions objecter que le simple fait de disposer de la technologie à même de concevoir des individus dominés – « avec une selle sur le dos » – n'est en rien une raison valable pour le faire, ni même pour vouloir le faire. À l'origine d'une telle crainte repose sans doute notre connaissance de l'Histoire, au cours de laquelle des êtres humains ont asservi et enchaîné leurs semblables. Mais selon les adeptes du transhumanisme, ses promesses de vertus morales, appuyées par la génétique, offrent l'espoir d'échapper à cette tendance et non de la perpétuer.

Le philosophe néo-zélandais Nicholas Agar offre une critique philosophiquement sophistiquée du transhumanisme. Supposez que

j'ai utilisé des technologies de pointe pour améliorer les facultés cognitives de ma chienne Coco. Le cerveau de Coco a maintenant la taille de celui d'un humain, et on y a installé une architecture neuronale qui permet des fonctions langagières. Sa gueule, sa langue et son larynx sont modifiés afin qu'elle puisse parler. Ses pattes avant ont changé : elles sont dotées de doigts et de pouces opposables qui lui permettent un contrôle fin de ses mouvements. Par conséquent, elle dispose de la dextérité nécessaire pour taper sur un clavier, coudre avec une aiguille, etc. Tandis que Coco développe ses capacités nouvellement acquises – linguistiques, cognitives et comportementales – elle entre à l'école primaire, et bientôt au collège, au lycée puis à l'université. Son ancienne existence lui semble dénuée d'intérêt : elle ne tombe plus en extase à l'idée d'une promenade autour du pâté de maisons ou d'un reniflage de lampadaires. Elle est frustrée de ne pouvoir s'assoupir sur un lit qu'en l'absence de ses maîtres, etc. Nous pensions avoir amélioré Coco, mais il semblerait plus exact de dire que nous l'avons détruite. La nouvelle Coco ne partage aucune des préoccupations, croyances et aspirations de l'ancienne Coco : nous l'avons tellement changée qu'elle a cessé d'être. La thèse d'Agar est, en substance, que le transhumanisme ne conduira pas à l'amélioration de la vie humaine, mais à la disparition de notre espèce. Cette argumentation anti-transhumanisme évoque la suggestion d'Aristote selon laquelle, si l'on souhaite le meilleur à un ami, il serait erroné de lui souhaiter de devenir un dieu. Un tel vœu impliquerait un changement de nature si radicale que ce serait la fin de cet ami. D'une manière analogue, Agar suggère que le transhumanisme ne répond pas aux désirs et aux préoccupations

humaines, mais entraîne la création d'êtres avec des désirs et des préoccupations non humaines.

Beaucoup de critiques se concentrent sur des propositions spécifiques d'améliorations radicales. On a tancé la proposition d'améliorer la capacité à être heureux, parce qu'elle se rapprocherait du *Meilleur des Mondes* d'Aldous Huxley, où l'on a aboli le bonheur authentique. On a condamné l'amélioration morale parce que ses bénéficiaires perdraient leur autonomie ou leur libre arbitre. Enfin les critiques font valoir que l'amélioration radicale de l'intelligence pourrait engendrer des « génies malfaisants ». Les transhumanistes ont ardemment répliqué à ces attaques. Nous pouvons qualifier l'une des lignes de défense de « réponse de compagnons en innocence ». Il existe aujourd'hui des êtres humains non modifiés qui, par la grâce de la loterie génétique, sont naturellement plus heureux, moraux et intelligents que la moyenne. Les transhumanistes soulignent que personne ne considère ces gens-là comme privés de bonheur authentique et de libre arbitre ni comme des génies malfaisants potentiels. Il est donc simplement faux, insistent les transhumanistes, de supposer que l'amélioration génétique entraînerait ces fâcheuses conséquences. Pour illustrer notre propos, imaginons que nous rencontrions dans l'avenir deux individus plus heureux que la moyenne grâce à leurs prédispositions génétiques. Le génome de l'un a été génétiquement modifié, tandis que l'autre a reçu sa prédisposition à la loterie génétique. Si on ne vous le disait pas, vous ne sauriez pas faire la différence. Il semble dès lors moralement arbitraire (selon les transhumanistes) d'affirmer que l'une de ces personnes ne connaît pas l'authentique bonheur. Les transhumanistes rejettent en effet l'idée qu'il y aurait une

distinction morale importante entre ce qui est créé naturellement ou artificiellement.

Considérations culturelles

Le transhumanisme soulève des interrogations importantes et profondes concernant notre avenir. J'espère que les lecteurs comprendront que cette problématique peut légitimement prétendre au statut de plus importante question du 21^e siècle. Il n'est pas possible de discuter tous les domaines potentiellement impliqués en un seul chapitre, même dans les grandes lignes. Mais permettez-moi de conclure avec ces quelques considérations additionnelles. L'une est la relation entre le transhumanisme et la religion. Alors que d'aucuns estiment que les religions sont nécessairement antinomiques avec le transhumanisme, l'Association Mormone Transhumaniste, l'un des groupes les plus anciens et les plus actifs, promeut avec plusieurs autres l'idée d'une compatibilité profonde. Nous n'avons pas abordé la question de la création de personnes artificielles – ordinateurs ou robots avancés. Nous avons éludé la problématique des relations entre le transhumanisme et l'art. Nous n'avons qu'à peine effleuré les liens avec le politique alors que dans plusieurs pays, des candidats qui défendent un programme ouvertement transhumaniste se sont présentés au suffrage.

Finalement, et c'est peut-être le plus important, nous n'avons rien dit sur les risques de catastrophe globale. Les transhumanistes sont aussi soucieux d'éviter des conséquences néfastes que de promouvoir la bonne utilisation des technologies, car parmi celles qui

les intéressent, elles sont nombreuses à pouvoir être appliquées aussi bien pour le mal que pour le bien.

L'AVENIR EN LIGNE

MIA, ordinateurs quantiques
et Internet

8 Le Cloud et l'« Internet des objets »

Naomi Climer

Le Cloud et ce qu'on appelle l'« Internet des objets » (communément abrégé IdO) forment une combinaison puissante, de celles qui détermineront nos vies futures. En quelques mots : le Cloud offre l'accès à un ensemble de ressources partagées : données stockées, processus d'analyse, applications, services informatiques, etc. Son principe : libérer votre propre machine de ces capacités en vous permettant, au moyen d'une simple connexion internet, d'y accéder depuis n'importe où. Nous sommes dès lors en mesure d'exploiter bien plus de ressources qu'à l'ordinaire et ce en toute autonomie. Une fois les choses basculées dans le Cloud, elles deviennent instantanément mobiles. Vous pouvez consulter vos emails depuis Paris ou Le Caire, travailler à Chicago ou à Tokyo tout en restant connecté à votre entreprise, regardant même Netflix pendant votre temps de repos. Le travail gagne ainsi en flexibilité ; les modes de vie et de divertissement s'en trouvent peu à peu transformés.

Un autre avantage du Cloud : faciliter le travail collaboratif. Puisque les données et les applications sont accessibles à distance, différentes personnes peuvent aisément travailler ensemble à une même tâche sans être physiquement réunies. On comprend l'importance que cela peut revêtir pour les entreprises dont les experts peuvent ainsi assister virtuellement les collaborateurs de

terrain sans se déplacer avec eux. De fait, les industries créatives et culturelles n'ont plus besoin d'envoyer des bataillons entiers pour couvrir un événement comme les Jeux Olympiques, il leur suffit de dépêcher quelques employés et d'effectuer l'essentiel du travail depuis leur quartier général. Bien sûr, cela nécessite davantage qu'une simple mise en relation numérique, il faut mettre en place des outils collaboratifs pour assurer les interactions dans cet environnement virtuel. (Quiconque a déjà organisé une téléconférence sait à quel point il peut s'avérer difficile de gérer les multiples intervenants, de savoir notamment à qui donner la parole et à quel moment. Mais il se sera également rendu compte que l'échange se trouve sensiblement amélioré si l'on introduit des repères visuels traduisant en ligne quelques gestes simples, comme lever la main par exemple.) La qualité et la créativité des outils de collaboration virtuelle seront donc un facteur clé pour le développement des usages du Cloud, Cloud dont nous ressentons d'ores et déjà l'omniprésence aujourd'hui.

Si Internet est un réseau planétaire permettant aux *personnes* de collecter et d'échanger des données, l'IdO en est équivalent pour les *choses* (comprenez les objets physiques comme les voitures, les thermostats, les frigos, etc.) En 2016, www.internetworldstats.com estimait le nombre d'utilisateurs d'Internet à quelque 3,7 milliards. À l'heure actuelle, les objets connectés nous dépassent déjà en nombre et les projections évoquent une augmentation à 50 milliards d'ici 2021. Dans certains contextes comme les salles de fitness ou les hôpitaux, les appareils intelligents sont devenus monnaie courante ; ils nous renseignent sur nos performances ou notre état

de forme, ils surveillent les paramètres vitaux des patients fragiles, leur rythme cardiaque, leur taux de glycémie, etc.

Nous n'en sommes toutefois qu'au début. En effet, même si les débats s'animent autour des problèmes soulevés par ces technologies : protection de la vie privée, sécurité, dégâts sociétaux, allant jusqu'à mettre en doute leur efficacité, leur développement semble absolument inéluctable.

L'industrie tâte le terrain en toute discrétion. Les retombées économiques s'annoncent extrêmement significatives, et ce à tous les niveaux. Les fermes d'éoliennes par exemple tirent déjà profit de capteurs pour adapter l'angle des pales à la direction du vent. À l'image d'un bateau qui gagne en vitesse en réglant l'orientation de sa voile, cette technique peut générer jusqu'à 25% d'énergie supplémentaire. Autre exemple : les usines commencent à connecter leurs données avec leurs fournisseurs pour suivre en tant réel les besoins de la production. Intégrés sur les chaînes de production, certains capteurs peuvent ainsi anticiper les problèmes avant même qu'ils ne surgissent. Les travaux de maintenance n'interviennent dès lors qu'en cas de nécessité, évitant de disperser l'effort des ingénieurs sur des tâches inutiles. De grands groupes internationaux comme Bosch ou Airbus vont jusqu'à faire circuler les données entre leurs différentes usines pour s'assurer que les problèmes et les interventions soient gérés de manière globale en s'appuyant sur toute l'expertise disponible, et ce d'où qu'elle vienne.

L'IdO permet en outre de collecter des données à très grande échelle. Des capteurs bon marché et à faible consommation énergétique peuvent fournir des informations sur différents objets, sur leur environnement ou sur les systèmes spécifiques dans

lesquels ils sont intégrés. Le contrôle peut s'exercer en permanence, de l'identification de fuites dans des conduites difficiles d'accès au suivi d'une épidémie de grippe par l'entremise des volumes de données amassées par nos téléphones portables.

En vérité, l'un des principal défi de l'IdO réside dans la transformation de ces masses de données brutes, convergeant de multiples sources, en descriptions à la fois intelligibles et exploitables. Cette médiation s'inscrit dans l'acronyme anglais DIKW (*Data–Information–Knowledge–Wisdom*), dont l'équivalent français serait : Données–Information–Connaissance –, ou Sagesse. Concrètement, les données brutes sont des flux continus de nombres ; et l'information utile en une circonstance précise repose peut-être dans le nombre 32, qui fait référence à la date de péremption d'un produit alimentaire. Transposée à la réalité, cette information se fera connaissance : le 32 correspondant à une bouteille de lait : vous apprenez donc qu'elle est périmée depuis la veille. La sagesse vous dictera enfin une décision : il est temps de racheter du lait ! L'exemple est certes trivial. Appliqué toutefois à une quantité de données aussi vastes que disparates, on comprend qu'il rend possible l'émergence d'une foule de conclusions intelligentes. On voit d'ailleurs fleurir de nouvelles catégories de compétences et d'emplois liées à ce traitement des données. Il s'agit désormais de trouver des collaborateurs capables d'extraire du flux de données l'information nécessaire à la prise de décision. Quelles sont les bonnes questions à poser ? Quel type de connaissances s'y fait-il jour ? Et à quelle échelle ?

D'ici une vingtaine d'années, la majorité de la population mondiale se concentrera vraisemblablement dans des villes. Il est

clair que cette densité impliquera de nouveaux défis sociaux et pratiques en ce qui concerne notamment l'énergie, l'éducation, la santé, et les transports. Des expériences ont déjà été lancées pour concevoir des « villes intelligentes » (*smart cities*), autrement dit des développements urbains dans lesquels les hôpitaux, les écoles et les transports sont interconnectés en vue d'optimiser la gestion municipale et la qualité de la vie. De nombreux projets de « ville intelligente » ont vu le jour en France (notamment à Paris, Lyon et Marseille, mais aussi dans des métropoles régionales comme Strasbourg, Le Havre, Rennes, Montpellier, voire de moindre envergure : Issy-les-Moulineaux, Les Mureaux, etc.) et dans le reste du monde. Ces essais couvrent un large éventail d'applications : des balises sonores aidant les personnes malvoyantes à s'orienter dans les rues de San Francisco ou dans la gare londonienne de Euston ; des capteurs dans les conteneurs à ordures permettant une meilleure réactivité et une approche ciblée de la collecte de déchets. Plusieurs entreprises proposent désormais ce type de conteneurs « intelligents » sur le marché, mentionnons par exemple Sigrenea, Cybeel, ou Green Creative (France), Bigbelly (États-Unis), Enevo (Finlande) ou encore Ecube Labs (Corée du Sud). Le système, devenu courant dans des milliers d'endroits, ne se contente d'ailleurs pas de détecter quand la benne est pleine, il va également prédire quand elle le sera afin d'optimiser le circuit des éboueurs. Cette technologie fonctionne plutôt bien mais il faudra encore laisser aux éboueurs le temps de lui faire confiance et de s'y adapter.

Nous touchons ainsi au cœur de la problématique de l'IdO et des technologies « intelligentes » : accepter leur présence effective dans nos vies. L'IdO, et c'est là sa force majeure, crée de la

nouveauté en faisant interagir des choses sans lien apparent. Faut-il encore gérer ces nouveautés dont les conséquences sur la performance et sur l'efficacité incitent à repenser notre rapport au monde : notre manière de nous déplacer, de nous soigner ou encore d'éduquer nos enfants. Bien souvent, le défi est davantage d'ordre pratique que technique. Pour les entreprises et les services publics, qui ne sont pas nécessairement habitués à travailler ensemble, il s'agit de trouver le moyen de faire converger leurs efforts sur un objectif commun. Cinq pays (les D5) semblent à l'avant-garde sur ce point : l'Estonie, Israël, la Nouvelle-Zélande, la Corée du Sud et le Royaume-Uni. Animés par un même principe d'ouverture, leur gouvernement collaborent au développement d'une économie numérique, se stimulant mutuellement pour faire avancer collectivement ce projet global.

Parmi les autres usages du Cloud et de l'IdO, indiquons encore la réalité virtuelle (RV) et augmentée (RA). De plus en plus fréquente dans les jeux vidéo et la publicité grand public, ces technologies commencent à se répandre dans bien d'autres secteurs d'activité. Les architectes et les agents immobiliers utilisent par exemple la RV pour visualiser les projets avant leur réalisation ; les armateurs de navires, les constructeurs d'avions ou de plateformes pétrolières y trouvent un moyen de projeter plus sereinement leurs investissements massifs ; certaines usines s'appuient sur la RA pour faire apparaître, à même les lunettes de leurs techniciens, des instructions permettant de les guider pas à pas. La réalité virtuelle et la réalité augmentée sont relativement nouvelles, mais il ne fait aucun doute, tant leur potentiel de développement est grand,

qu'elles intégreront bientôt le quotidien de nos structures éducatives, de notre système de santé, de notre travail et de nos loisirs.

En nous efforçant de porter notre regard par-delà leurs applications actuelles, nous comprenons en effet que les possibilités du Cloud et de l'Ido sont aussi nombreuses que précieuses pour relever les défis globaux qui nous attendent.

Les progrès médicaux impliqueront davantage de capteurs physiologiques qu'il n'en existe aujourd'hui. Vraisemblablement, ils se multiplieront sur nos corps pour contrôler jour et nuit notre état physique et émotionnel, et pour nous inciter à prendre mieux soin de nous. Les sportifs d'élite en font déjà usage pour améliorer leurs performances. Dans les milieux professionnels, à l'image des salles de marchés financiers où les employés sont soumis à un haut niveau de stress, on expérimente également des méthodes de contrôle favorisant une meilleure gestion des situations anxiogènes. Mais nous connaissons peut-être l'avènement d'un monde dans lequel chacun d'entre nous, en prise directe avec son propre flux de données, sera capable de contrôler ses paramètres en permanence. Nos capteurs corporels ordonneront par exemple à notre réfrigérateur de commander des fruits et des légumes, au chauffage central de s'ajuster à notre fièvre ou d'appeler un médecin si notre température franchit un seuil critique. Ils pourraient même, pourquoi pas, reporter nos rendez-vous professionnels du lendemain, déduisant notre incapacité de travail de notre état de santé.

Les professionnels pourront nous diagnostiquer et nous soigner à distance. L'assistance aux personnes âgées en sera grandement améliorée. Les technologies portatives, telles que les exosquelettes et les prothèses de membres, tireront parti de l'IdO pour s'adapter à

nos données physiques. (Notre corps entier pourra sans doute être piloté depuis une tablette – Touch Bionics propose déjà une application i-limb pour contrôler une prothèse de main depuis un smartphone.)

L'analyse des volumes de données fournies par l'IdO pourrait aboutir à de nouveaux modèles de fonctionnement susceptibles de révolutionner nos existences. L'université de Stanford a par exemple utilisé des algorithmes conçus pour le *big data* afin d'étudier l'efficacité de certains médicaments sur l'activité génétique causée par les maladies contre lesquelles ils étaient habituellement prescrits. Ils ont conclu que plusieurs médicaments pouvaient également combattre efficacement d'autres maladies. Considérant le temps et les coûts des essais cliniques, on comprend que cela pourrait représenter un grand pas en avant pour autant que les données issues de tels essais soient mis à la disposition de tous. Les groupes pharmaceutiques nord-américains et européens ont d'ores et déjà convenu d'un échange de données. L'avenir nous réserve sans doute d'autres percées similaires.

Les soins évolueront vers la personnalisation – car, dans la mesure où nous serons les bénéficiaires directs de nos propres *big data*, il deviendra naturel que les médecins puissent y accéder pour nous prendre en charge. Ils analyseront ainsi nos modes de vie (reflétés par notre activité sur les réseaux sociaux, notre CV, les sports que nous pratiquons, notre adhésion à un club de dégustation de vin, etc.) et éplucheront nos données génétiques, nos réactions aux précédents traitements, pour croiser ces informations avec l'ensemble des recherches médicales publiées dans le monde. Bien sûr, cela soulève d'importantes questions sur la protection de la vie

privée, questions qu'il s'agira de résoudre (le chapitre 9 aborde ce point de manière spécifique), mais le potentiel d'optimisation des soins est incontestable.

Aujourd'hui même, le Cloud et l'IdO seraient déjà en mesure de livrer l'un de leurs plus grands bienfaits : l'éducation universelle. Elle se fait pourtant attendre. Alors que les paradigmes de notre monde se transforment, les opportunités d'apprendre ce que nous avons besoin de savoir afin d'entrer pleinement, où que nous naissions, dans la nouvelle ère économique, sont excellentes... en théorie du moins. Faudrait-il encore franchir l'obstacle de la connexion universelle à Internet. Les Nations Unies et le Forum économique mondial en ont d'ailleurs fait un objectif prioritaire. Certains géants de web comme Facebook, Microsoft ou Google, ainsi que des personnalités et des philanthropes, y travaillent également activement.

Ce monde entièrement connecté, virtuel, efficace et régi par les données du Cloud et de l'IdO aurait le potentiel de donner à chacun l'accès à des services personnalisés et ainsi d'améliorer la qualité de vie de tous les désavantagés ou défavorisés. Il aurait le pouvoir de réduire la consommation d'énergie et le gaspillage alimentaire en optimisant le rendement de la production, et de diminuer les coûts de la santé en ajustant les soins à chaque besoin spécifique.

De nombreux défis doivent cependant être relevés pour donner forme à ce monde rêvé. Quatre d'entre eux me semblent particulièrement significatifs : ils concernent la sécurité, la couverture réseau, l'énergie et la société.

La protection de la vie privée et la sécurité soulèvent toute une série de questions. Pour les individus, le souci principal est de

protéger leurs données privées. Or tirer le meilleur parti de l'IdO suppose d'ouvrir son intimité à des appareils qui observent et enregistrent nos moindres faits et gestes. Plus nous les entraverons, moins bons seront les services que nous recevrons. Dans un sens cela relève d'un choix personnel, mais de sérieuses protections doivent tout de même être mises en place, ainsi qu'une vigilance continue. On peut en effet se demander quel usage les grandes entreprises technologiques comme Apple, Facebook et Google, voire les gouvernements, pourraient faire de cette masse d'informations privées. Certes ils l'utiliseraient pour personnaliser leurs services, mais cela pourrait aisément glisser vers différentes formes d'abus. Entre la personnalisation des services et l'espionnage, il n'y a qu'un pas. Nos données médicales pourraient conduire notre assurance à augmenter notre prime. Si elles ne sont pas correctement protégées, nos données personnelles peuvent nous être usurpées, et avec elles notre identité. Les grandes firmes technologiques accroissent leur puissance et leurs revenus à mesure qu'elles collectent les informations des quelques milliards d'individus peuplant cette terre. Un tel pouvoir, s'il peut se fonder sur des buts louables, ouvre inévitablement des possibilités d'exploitation et de manipulation. Conscients de ce risque de dérive, certains gouvernements et groupes de consommateurs se mobilisent aujourd'hui dans le monde entier.

Pour les individus comme pour les entreprises, tout appareil connecté prête le flanc aux *hackers*. Quelqu'un peut-il prendre le contrôle de notre maison en piratant notre bouilloire ? Un gouvernement peut-il prendre possession des centrales électriques d'un autre pays en infiltrant une machine connectée ? Aussi

effrayant que cela puisse paraître, la réponse est « oui » dans les deux cas. En 2010, le ver informatique Stuxnet (l'un des virus les plus célèbres de l'histoire du *hacking*) a visé le système de contrôle des centrifugeuses du programme nucléaire iranien. Une fois infectées, celles-ci finissaient par s'autodétruire. Selon une source, Stuxnet aurait mis hors service près d'un cinquième des centrifugeuses nucléaires iraniennes. En 2015, une autre cyberattaque, cette fois-ci en Ukraine, priva temporairement 80 000 clients de courant électrique. Ces deux exemples laissent à penser que les conflits militaires se joueront à l'avenir sur Internet, et que l'IdO comme le Cloud seront militarisés par des pays malveillants.

En 2015 toujours, un groupe de hackers a pris en guise de démonstration le contrôle d'une Jeep sur une autoroute via son autoradio connecté. Depuis ce hacking « bienveillant », les constructeurs automobiles ont redoublé d'efforts pour améliorer la protection de leurs produits. Les risques d'une cyberattaque sur les véhicules, sur les maisons connectées, sur les infrastructures d'un pays (réseaux électrique ou hydraulique) ou sur des entreprises stratégiques, sont on ne peut plus réels. De l'avis des experts, c'est ainsi que se déclareront les guerres futures. On comprend que la cybersécurité n'a pas fini de barrer les manchettes des journaux.

La question de la couverture réseau est évidemment moins spectaculaire. Que la connexion passe par la fibre, le wifi ou le réseau téléphonique cellulaire, elle constitue la condition nécessaire de l'IdO. Or, si le réseau se déploie aisément en zone urbaine, il atteint plus difficilement les régions reculées. Les voitures sans conducteur, la chirurgie à distance et les capteurs (comme ceux des conduites d'eau) nécessitent tous un accès Internet ; un effort

d'extension du réseau est en cours dans le monde entier. La 5G, prochain standard de téléphonie mobile, sera sans doute une part de la solution – la couverture universelle et la possibilité de gérer l'interaction d'un grand nombre d'objets connectés font partie de son cahier des charges. Atteindre une couverture complète et une bande passante en permanence satisfaisante demandera une approche collaborative, et holistique pourrait-on dire, entre les opérateurs téléphoniques et les fournisseurs de connexion. Pour tirer le meilleur parti des avancées technologiques les individus, les communautés, les entreprises et les gouvernements devront être interconnectés et collaborer de manière plus efficace. Les produits devront intégrer la perspective de l'IdO dès leur phase de conception ; les services tels que les télécommunications devront tenir compte des besoins en termes de transports, de santé, de loisirs, d'agriculture, etc., dans l'optique de leur performance ; et enfin, les gens devront accepter de partager leurs données privées au profit de tous.

Parallèlement à l'extension du réseau, l'augmentation des flux de données nécessitera d'accroître encore les infrastructures de support. L'entreprise Cisco Systems prévoit une multiplication par dix de la consommation de données d'ici 2020 ; concernant l'augmentation proportionnelle de la consommation énergétique, les opinions divergent. D'après le journal britannique *The Independent*, les *data centers* ont consommé environ 3% de toute l'énergie mondiale en 2016, et l'on s'attend à cela triple d'ici dix ans. La prolifération de dispositifs collectant, stockant et traitant des données pour l'IdO constituera un facteur de cette croissance mais ne sera pas, et de loin, le plus important. En effet, beaucoup des capteurs branchés sur l'IdO traiteront des volumes de données relativement

faibles – les capteurs typiques ne produiront que quelques centaines de mégaoctets par an. À titre comparatif, l'usage de la vidéo représente au niveau mondial environ un gigaoctet par heure. Elle nécessite par ailleurs une forte puissance de calcul et des capacités de mémoire importantes. La vidéo représente la majeure partie du flux numérique actuel et augmentera encore en suivant le cours de nos loisirs et de nos modes de vie. Cela posera dès lors un sérieux problème en termes de consommation d'énergie, ce que les centres de données s'efforcent d'ailleurs de résoudre en améliorant l'efficacité de leurs installations. Cela répond bien sûr et en premier lieu à un intérêt financier. Les grands acteurs comme Facebook, Google et Apple tentent en effet de s'orienter sur les énergies renouvelables et de construire leurs fermes de serveurs dans des régions climatiques froides dans le but de réduire les coûts de refroidissement. L'économie d'énergie occupe donc une place centrale dans la conception et le fonctionnement de leurs systèmes. Certains estiment en outre que des mesures de rationnement ou de taxation de la vidéo doivent être mises en œuvre pour contenir l'augmentation de la consommation énergétique.

Enfin, en plus des questions de sécurité, de réseau et d'énergie, les avancées technologies présentent également des enjeux sociétaux que nous avons commencé à esquisser plus haut. L'avenir du travail par exemple. Que ferons-nous quand tous les objets seront intelligents et autonomes ? Quels emplois restera-t-il pour les êtres humains ? Et que pourra-t-on nous enseigner à l'école si tout est en changement continu autour de nous ?

L'avenir du travail est un vaste chapitre. Les types d'emploi, la formation de ceux qui les exercent et la reconnaissance de leur

valeur sociale sont en effet des sujets très étudiés. Plusieurs pays, notamment la Finlande, la Namibie, la France, le Canada et les États-Unis, démarrent une réflexion sur les bienfaits potentiels sur l'ensemble de la société, d'un revenu minimum universel ou d'un temps de travail raccourci. L'Écosse sera vraisemblablement la première nation à tenter une telle expérience. À vrai dire cela fait des siècles qu'on nous prédit l'oisiveté mais l'histoire a démontré que la technologie engendre en principe davantage de travail qu'elle n'en détruit. On ne sait toutefois pas si cette tendance se confirmera ou non.

Dans tous les cas, l'IdO contribuera vraisemblablement à développer une économie du partage – un monde dans lequel la notion de propriété perdra de son importance. Nous ne possédons déjà plus notre musique et nos films mais n'en payons que l'accès. Tout porte à croire que, de la même manière, nous partagerons bientôt nos voitures>, nos cuisines et même nos animaux de compagnie. En Corée du Sud, le partage de la salle de séjour connaît une hausse significative. En effet, alors que les appartements y sont relativement exigus, les jeunes, qui pour beaucoup vivent encore chez leurs parents, cherchent à se retrouver entre eux dans des endroits casaniers. Les propositions de location d'espace à l'heure rencontrent ainsi un succès vigoureux. Si l'on suit cette tendance, il est probable que, mangeant de plus en plus à l'extérieur, la présence de cuisine dans nos maisons se justifie de moins en moins. La cuisine pourrait devenir un espace de copropriété plutôt qu'un espace privé intégré dans chaque appartement d'une résidence. Cette logique de conversion potentielle des espaces se manifeste déjà, dans une certaine

mesure, en Californie où les places de parking sont conçues pour être requalifiées en salle de sport ou de cinéma dès que le partage des véhicules sera entré dans les mœurs. À New York, il est possible (après avoir donné les garanties d'usage) de louer un chien à l'heure pour accompagner sa promenade, une aubaine pour ceux qui estiment trop contraignant de posséder son propre animal (ou qui ont juste besoin d'un chat pour régler un occasionnel problème de souris). L'économie du partage soulève enfin de nombreuses questions sur l'avenir des industries manufacturières. En théorie nous aurons besoin de moins d'objets si nous les partageons. Reste à savoir si notre appétit de consommation s'amenuisera à mesure que notre consommation de service augmentera.

En conclusion, et malgré tous les obstacles importants qu'il s'agira de surmonter, force est d'admettre que le Cloud et l'IdO devraient favoriser des avancées sociales majeures. La planète aura besoin de créativité et d'innovation – et devra notamment compter sur ses *digital natives* – pour appréhender ces nouvelles possibilités et concevoir un monde meilleur. Le potentiel du Cloud et de l'IdO dans l'amélioration de la qualité de vie, l'augmentation de la productivité et la gestion des problèmes globaux est là. Il ne demande qu'à devenir réalité.

9 Cybersécurité

Alan Woodward

Contrairement à la légende urbaine, nous n'avons pas créé internet comme un réseau capable de résister à des guerres nucléaires. L'internet d'origine (appelé DARPANet, parce que développé sous l'égide du *US Department of Defense's Advanced Research Projects Agency*) a été créé à la fin des années 60 pour permettre aux chercheurs de partager librement leurs données. Tim Berners-Lee a poursuivi cette philosophie en créant le *Hypertext Mark-up Language* (HTML) à l'origine ce que nous appelons aujourd'hui le web. Ensuite, au milieu des années 90, on a commercialisé l'internet. Et tout a changé. Rapidement on a compris que pour transmettre des informations financières à travers ce réseau, aussi récent que fondamentalement public, nous devons trouver un moyen d'assurer la sécurité et la confidentialité. Malheureusement on a construit ce nouveau monde connecté ou « cyberspace » sur des technologies qui n'ont jamais été pensées dans une optique de sécurité. Inévitablement, la cybercriminalité a emboîté le pas aux flux financiers en ligne dans le but d'exploiter cette faiblesse fondamentale. Ainsi est née la cybersécurité.

Quiconque possède un ordinateur s'acquitte de ce fardeau grandissant (en tout cas, je l'espère) : installer un antivirus et un pare-feu, adopter une bonne stratégie de mots de passe, etc. De même que les criminels font preuve de plus en plus d'ingéniosité, les utilisateurs consacrent de plus en plus de temps à prendre garde et

à maintenir à jour leurs protections. C'est un problème. Même les plus prévenants d'entre nous présentent des faiblesses humaines que les délinquants peuvent exploiter. Des sept cyber-péchés capitaux (apathie, curiosité, crédulité, courtoisie, avidité, manque de confiance et négligence), l'apathie est sans doute la plus dangereuse. Penser que rien ne peut jamais vous arriver est le plus sûr moyen de vous assurer une tuile. Face au problème dit « PICNIC » (pour *Problem is In the Chair Not In the Computer* : le problème est assis sur la chaise, pas dans l'ordinateur), les scientifiques se sont demandé si les humains ne pouvaient pas simplement être retirés de l'équation.

On retrouve la DARPA. L'agence a lancé un concours pour développer un système basé sur l'intelligence artificielle qui protégerait les ordinateurs contre les cyberattaques. Sans que soient impliqués des humains, donc. La première finale de la compétition s'est tenue en 2016 à Las Vegas. C'est là que se rassemblent chaque année des hackers du monde entier pour échanger leurs idées et faire la démonstration de leurs dernières techniques dans le cadre de conférences comme Black Hat et DefCon.

Cette première compétition affichait de modestes ambitions. Chaque concurrent reçut plusieurs programmes informatiques et dut déterminer s'ils planteraient après certaines manipulations. Ensuite avait lieu le véritable défi : modifier ces programmes pour qu'ils ne soient plus vulnérables à de telles attaques.

Les systèmes automatiques furent opposés aux êtres humains dans une compétition de type Capture du drapeau. Le résultat ? Eh bien, ce n'était pas très clair : chaque système était bon dans certains domaines et médiocre dans d'autres. Cependant on a pu

voir à l'œuvre ce qu'on appelle « l'apprentissage machine », et s'il y a *une* chose que les ordinateurs font très bien, c'est apprendre. Plus vous leur fournissez de données, meilleurs ils deviennent pour distinguer des situations récurrentes (comme des problèmes exploitables par des hackers). On ne sera pas surpris que de nombreuses équipes de recherche étudient maintenant comment utiliser l'apprentissage machine pour la cybersécurité.

Durant la compétition, les systèmes d'intelligence artificielle ne reconnaissaient pas mieux les motifs que leurs adversaires humains. Et cela n'a que peu d'importance. Après tout c'était un premier essai. Cela a montré qu'à l'avenir l'IA pourrait être la base de la cybersécurité, et que cela pourrait même être pour bientôt. Lors de la conférence à Las Vegas, tandis que se déroulait la compétition, une entreprise présenta ce qu'elle déclara être le premier antivirus « cognitif » reposant sur l'intelligence artificielle : DeepArmor.

DeepArmor ne cible qu'un aspect de la cybersécurité (le combat contre les virus), mais c'est le domaine qui a le plus besoin d'aide automatisée. C'est parce que les êtres humains (ou n'importe quelle procédure qui fait appel à des êtres humains) ne peuvent tout simplement pas faire face au flux des virus émergents. Près d'un million de nouvelles menaces apparaissent chaque jour, et bien que nombre d'entre elles soient des variantes de virus existants, on doit les identifier une à une et indiquer au logiciel comment les neutraliser. Cela ne peut aller qu'en empirant puisque les criminels ont eux-mêmes découvert que la technologie pouvait les aider à contourner les antivirus. Ils ont mis au point des virus qui se métamorphosent, exactement comme leurs homologues biologiques dans la nature. Même si vous avez un exemplaire du code qui avait

été lancé, il pourrait avoir suffisamment changé pour que vous ne le reconnaissiez plus après seulement quelques infections. Il n'est donc pas totalement surprenant que les initiateurs de DeepArmor publient un logiciel qui vise à imiter le système immunitaire humain : le bien nommé Antigena.

Cette évolution marque un tournant radical dans la façon de penser la cybersécurité. Elle influera nos futures défenses. Aux premiers temps de la sécurité sur internet, nous voulions surtout bloquer les attaques à la frontière. Un peu comme un château fort, nos systèmes – que ce soit votre ordinateur portable à la maison ou vos données médicales à l'hôpital – sont conçus pour barrer l'entrée aux virus ou à n'importe quel autre type d'attaques. Cependant, ces principes originaux ne peuvent faire face à l'hyperconnectivité dans laquelle nous sommes tous partie prenante. Le soi-disant périmètre de défense n'est désormais plus un concept adéquat. Nous voulons que nos châteaux forts restent ouverts, mais sans que les passants repartent avec les bijoux de la couronne. Nous devons pouvoir accueillir les visiteurs anonymes mais aussi être capables de détecter les individus suspects.

Une évolution récente de la cybersécurité est à l'image des multiples barrières défensives que l'on peut observer dans de nombreux châteaux forts. Nous pourrions autoriser les gens à circuler librement dans certaines parties du château, peut-être même ouvrir à certains l'accès à des chambres plus centrales, mais nous gardons les bijoux de la couronne dans le donjon, l'ultime citadelle de notre sécurité.

Il se trouve que les machines excellent à surveiller les comportements et à les corréler à des conséquences non

souhaitées. Plus vous laissez une machine observer, meilleure elle deviendra dans la détection de ces comportements indésirables. Augmentez le volume des données, et les résultats s'amélioreront de manière spectaculaire. Il semblerait donc que notre cybersécurité future soit résolue : nous pouvons la confier entièrement aux ordinateurs. Mais le recours à la seule intelligence artificielle, sans intervention humaine, soulève quelques questions intéressantes. La moindre d'entre elles étant qu'on doit l'éduquer. Cela a donné naissance à une nouvelle discipline qui a pour objectif d'adapter l'intelligence des machines aux besoins des êtres humains.

Tout d'abord, il existe l'éventualité alarmante que l'internet devienne une sorte de zone de guerre électronique où s'affrontent IA bienveillantes et IA malveillantes. De même que nous ne sommes pas conscients de toutes les batailles biologiques qui se déroulent chaque jour dans notre corps, peut-être devons-nous apprendre à vivre avec des infections digitales constamment combattues par notre « système immunitaire ». La plupart du temps ces luttes passent inaperçues. Mais de temps en temps, nous contractons une maladie et avons recours aux antibiotiques. Mais si l'infection parvient à déjouer les technologies de défense, le patient meurt. Nous devons peut-être accepter de n'être pas toujours capables de « désinfecter » nos systèmes ; il nous faudrait alors les effacer complètement et les reconstruire avec des logiciels sains. C'est déjà une réalité avec les « rançongiciels » (*ransomware*) qui ne vous laissent d'autre choix (si vous ne comptez pas payer la rançon) que de reconstruire votre système. La clé, bien sûr, est de toujours avoir une sauvegarde de vos données, la seule partie ayant réellement de

la valeur dans votre ordinateur. Cela nécessite une intervention humaine.

Il s'agit ensuite de décider jusqu'où l'IA prendra le contrôle de nos actions : devrions-nous être autorisés à passer outre ses injonctions ? C'est évident, pensez-vous sans doute. Malheureusement les sept cyber-péchés capitaux entrent de nouveau en scène. Imaginez un scénario dans lequel vous tentez de visiter un site web. L'IA détecte un problème et affiche une alerte afin que vous n'alliez pas plus loin. Vous pourriez attendre qu'apparaisse un bouton qui vous permet d'outrepasser cette alerte. Or des études ont montré que les êtres humains ont tendance à ignorer les avertissements, peut-être parce que nous sommes curieux ou apathiques, ou simplement parce que nous n'aimons pas les interdits. Quelle qu'en soit la raison, si vous allez de l'avant votre système sera très probablement infecté. Vu sous cet angle, il semble pertinent de laisser le contrôle absolu à l'IA.

Des recherches montrent aussi que nous serions exposés à de si nombreuses alertes que nous finirions de toute manière par les ignorer. Ce phénomène porte même un nom : la fatigue sécuritaire, qui incite aux comportements à risque. Afin d'éviter cet écueil, notre future intelligence artificielle devrait déterminer quelles sont les menaces les plus importantes. Elle devrait décider quand le nombre d'alertes devient excessif, et opérer une sorte de jugement pour savoir quand afficher un avertissement pour que nous en tenions compte. Mais bien sûr l'IA n'exerce aucun jugement – seuls les humains le font. L'IA se contente de répondre par oui ou par non.

Cela nous conduit à un autre problème. Qui seront les humains impliqués ? Par exemple pourrait-on utiliser les règles sur lesquelles

se base l'IA pour censurer certains sites ? Cela revient à se demander ce que l'on doit considérer comme dangereux. La cybersécurité a étendu son empire afin d'éviter que les plus naïfs et les plus innocents d'entre nous ne soient exposés à des contenus déstabilisants ou incités à des comportements répréhensibles. Si l'IA du futur doit nous « protéger » contre notre propre curiosité, qui donc décidera des limites ? Ou alors nous laisserions l'IA « apprendre » – ce qui est dangereux – et décider en conséquence ? De manière compréhensible, beaucoup pensent qu'il s'agit là d'un véritable cauchemar. Même sans dictateur ou État surprotecteur qui édicteraient des règles auxquelles vous ne souscrivez pas, l'IA pourrait d'elle-même aller plus loin et statuer que la grande majorité de ce que l'on trouve dans le cyberspace est dangereux. Ce terme « dangereux » est notoirement ambigu.

Dans les prochaines années, nous devons décider si nous voulons que l'IA nous protège dans le cyberspace ou si nous préférons nous en remettre aux méthodes courantes. Ce n'est pas un choix facile, mais qui, en l'absence de débat public, sera fait à notre place. Existe-t-il une alternative si nous ne voulons pas de l'IA et si les procédés actuels sont de moins en moins efficaces ? Eh bien, peut-être.

Supposons que nous décidions qu'un être humain doit nécessairement être partie prenante quelque part dans le système. Mais alors que penser de situations où nous ne pouvons pas être impliqués directement ? Quid de l'internet des objets – ces bataillons de plus en plus nombreux d'appareils intelligents qui fonctionnent sans surveillance et qui communiquent sans aucune intervention de notre part ? Nos frigos, bouilloires et autres grille-pain seront tous

connectés en réseau pour nous rendre de meilleurs services. Toutefois, même si cela ne vaut pas la peine de hacker votre grille-pain pour vous dérober des informations, il pourrait être forcé de rejoindre une armée d'appareils zombies dans un *botnet*. Il serait prêt à participer à une attaque par déni de service, où des masses de données inutiles sont envoyées à un système pour l'empêcher de répondre à ses usagers légitimes. La taille de l'internet des objets va devenir stupéfiante : des millions de dispositifs supplémentaires vont rejoindre le réseau, et les hackers pourront en exploiter insidieusement les capacités inusitées. Nous sommes confrontés à cette situation quelque peu ridicule où un pays pourrait être mis à genoux par ses propres appareils électroménagers.

Nous pourrions retourner aux fondamentaux, soit la technologie de base sur laquelle nous avons construit l'internet. Nous pourrions modifier certains aspects de cette technologie afin que vous soyez clairement identifié où que vous alliez sur l'internet, comme le seraient les personnes avec lesquelles vous interagissez. Vous seriez assurés que vos emails proviendraient de là où ils prétendent provenir. Si un site web diffusait un logiciel malveillant, nous pourrions aisément en retracer l'origine et le neutraliser. Si un individu s'attaquait à votre système, vous sauriez exactement qui il est et d'où il vient. Tout ceci serait possible si nous passions à ce qu'on appelle l'internet *Protocol Version 6* (ou IPv6). Il existe depuis les années 1990 et il est probable qu'il tourne en ce moment sur votre ordinateur, mais les tentatives pour accroître son utilisation ont eu peu d'effets. La plupart d'entre nous se satisfont de l'IPv4 des origines malgré ses problèmes inhérents.

Vous n'auriez pas besoin d'un nouvel ordinateur, mais pour le sécuriser il faudrait que tout un chacun (a) adopte l'IPv6 et (b) accepte d'avoir une identité numérique. Et c'est là que le bât blesse. Tout le monde ne souhaite pas pouvoir être identifié en ligne. Les gens se sont habitués à ce que l'internet soit un endroit où ils peuvent évoluer librement, sans se conformer aux normes qu'ils rencontrent dans leur vie physique. Nous apprécions de pouvoir explorer des montagnes de sites web dans un relatif anonymat. Certains vont plus loin et protègent activement leur identité à l'aide de logiciels comme TOR (*The Onion Router*) qui masquent même leur adresse IPv4.

TOR a été partiellement développé par la marine américaine avec les meilleures intentions. Mais il est devenu tristement célèbre pour fournir une base à ce qu'on appelle les « services cachés » : des sites web accessibles seulement à l'aide du navigateur TOR dont vous ne pouvez pas déterminer la localisation géographique. Aussi connu sous le nom de *Dark web*, ce cyberspace héberge des sites qui vendent à peu près tout, des stupéfiants aux composants d'armes de destruction massive. Le Dark web est désormais complété par de nouvelles formes de devises virtuelles anonymes, dont la plus connue est le Bitcoin. Ce sont des « cryptodevises », qui ont pour but d'être les équivalents virtuels de l'argent liquide : intraquables et facilement transportables. On ne s'étonnera pas des conclusions d'Europol, qui a déterminé que 40% des transferts financiers entre organisations criminelles étaient réalisés avec des cryptomonnaies.

On ne sera pas non plus surpris que les autorités légales aient déployé des efforts considérables pour démasquer les acteurs du

Dark web. Ce qu'apporte la technologie, la technologie peut le retirer : en l'occurrence, l'anonymat. Mais c'est une course sans fin à l'armement. À peine a-t-on trouvé un moyen d'identifier ceux qui se cachent dans le Dark web que les techniques s'adaptent et la méthode devient caduque. Même si on découvre une faille fondamentale dans le fonctionnement d'un des éléments, celui-ci est rapidement remplacé. Par exemple TOR dépend dans une certaine mesure de volontaires pour faire tourner les serveurs du réseau – appelés « nœuds » – qui protègent l'anonymat des utilisateurs du système. Les autorités ont commencé à exploiter ce fait en mettant en place des nœuds grâce auxquels elles auraient un point d'observation partiel de ce qui se passe sur le Dark web. Mais on a mis à jour la technologie pour empêcher ces serveurs, qualifiés de « mauvais oignons », de violer l'anonymat des utilisateurs de TOR. En outre, un nouveau type de technologie est en train d'émerger – appelée *Peer-to-Peer Dark web* – qui se présente lui-même comme « l'internet invisible ». Contrairement au réseau TOR, bien connu, les réseaux d'anonymisation P2P ont une présence diffuse à travers tout l'internet et se mêlent au bruit de fond.

La même chose s'est produite avec les cryptodevises (une forme de monnaie numérique cryptée). Elles utilisent typiquement une technologie nommée *blockchain*, grâce à laquelle toutes les transactions sont publiques, ne peuvent être ni falsifiées ni dénoncées, mais sont aussi conçues pour être totalement anonymes. La technique classique des enquêteurs de police est « suivez l'argent ». Mais de par leur conception, même les cryptodevises les plus célèbres comme le Bitcoin rendent la traque difficile. Malgré tout, de nouvelles techniques font leur apparition

aujourd'hui, offrant aux autorités une chance de découvrir où finit le cash virtuel. Mais exactement comme pour TOR, à peine ces procédés étaient-ils développés pour déterminer qui utilisait des Bitcoins, qu'on les réduisait à l'impuissance avec d'autres formes de monnaie virtuelle. De nouvelles cryptodevises comme ZeroCoin ont surgi, spécifiquement conçues pour déjouer les dernières techniques des forces de l'ordre.

Supposons que IPv6 et ses outils additionnels de sécurité deviennent le système par défaut pour l'internet. Il y aura probablement encore des internautes honnêtes – ainsi que des criminels – qui souhaiteront rester anonymes. Des technologies comme TOR pourraient bien perdurer (quoiqu'elles nécessiteraient de légères adaptations), ce qui semble rendre IPv6 futile. Cependant, les plus enthousiastes ne se laissent pas atteindre par cette occasion manquée de sécuriser l'internet que marque le lancement raté d'IPv6. Cette technologie finira par s'imposer. Nous pourrions nous retrouver avec un internet à deux étages : un pour ceux qui sont satisfaits d'être identifiés et potentiellement suivis, et un pour ceux qui souhaitent rester en dehors du système. Dans certains pays ce ne sera pas une option. Mais là où le choix restera possible vous pourrez vous livrer à vos activités dans votre jardin clôturé sans craindre une attaque. Et si ce jardin vous semble être une cage dorée, vous serez libre d'en sortir pour vous aventurer dans le reste de l'internet : une partie du cyber-espace comparable à l'ouest sauvage américain. Le choix sera le vôtre, mais vous pourriez réaliser que si vous avez délibérément quitté le sanctuaire du jardin, on pourrait ne pas vous permettre d'y revenir. Après tout, si vous vivez dans une zone stérile, vous ne pouvez entrer et sortir

sans passer une série de contrôles afin d'assurer que vous ne ramenez rien de dangereux.

Les hackers verraient ceux qui évoluent dans l'espace protégé comme des proies appétissantes. Ils trouveraient inévitablement le moyen d'y entrer furtivement pour s'attaquer aux ingénus. Aujourd'hui, nous sommes familiers avec la façon dont les hackers utilisent ce qu'on appelle l'ingénierie sociale – par exemple une adresse email connue ou une information personnelle afin de nous inciter à cliquer sur un lien. Mais si elles étaient complètement inattendues, ces attaques auraient des conséquences bien plus graves. Elles seraient bien plus difficiles à réaliser à l'intérieur de notre jardin protégé, mais elles ne manqueraient pas de survenir.

Les appareils de l'internet des objets feraient partie de notre jardin et pourraient se révéler être le maillon faible. Si vous pensez aux cambrioleurs les plus célèbres, ils ne pénètrent pas dans la banque en fracassant la porte d'entrée. Ils se faufilent discrètement par les égouts de sorte à disparaître avant qu'on ne réalise que les coffres sont vides. Aucun cyberspace ne sera jamais totalement sécurisé, mais ce serait beaucoup plus sûr que celui que nous connaissons aujourd'hui. La question est : de quel côté de la clôture voudriez-vous vous trouver ?

On a suggéré que notre futur cyberspace nécessitera peut-être deux formes de force de l'ordre. À l'intérieur de l'espace protégé nous aurions toujours besoin d'une certaine forme de police, ne serait-ce que pour régler des contentieux commerciaux. Ses agents seraient comparables aux gardiens de la paix qui patrouillent dans le quartier, connaissent tout le monde et interviennent au cas par cas avec quelques mots discrets. Hors les murs du jardin, vous auriez

besoin de quelque chose plus proche des shérifs du vieil Ouest sauvage. Ces cybershérifs seraient des experts mandatés pour traquer et contenir les délinquants en ligne. De tels agents spécialisés ont existé dans d'autres domaines auparavant. Par exemple la création des chemins de fer a généré de nouvelles formes de criminalité et l'on a créé la police des transports britanniques. Quand le terrorisme s'est attaqué au transport aérien, on a renforcé la police de l'air pour surveiller les individus dangereux. Et comme l'internet est un phénomène global, nous pourrions même voir apparaître des cyber-Casques bleus qui auraient pour mission, sous l'égide des Nations Unies, de maintenir la paix à l'extérieur des zones sécurisées. La question clé est de savoir qui mandatera ces cybershérifs.

À l'intérieur et à l'extérieur de notre cyberzone sécurisée, nous devons déterminer quelles lois appliquer. À l'heure actuelle, les législations suivent typiquement des frontières nationales, dont se moquent les cybercriminels. Si j'envoie des millions d'emails d'hameçonnage (*phishing*) et commets ainsi une fraude depuis un pays à destination de personnes d'un autre pays, je cours moins le risque d'être poursuivi et condamné que si j'entre dans une banque avec un fusil à canon scié. Les bénéfices sont quant à eux bien supérieurs : avec très peu de risques, le cybercrime peut produire un retour sur investissement de 1000%. Il n'est donc pas surprenant que la criminalité en ligne soit maintenant la plus importante forme d'acte illégal. Et pourtant, nous n'avons toujours pas d'agence chargée d'appliquer les lois en ligne.

Pour nous attaquer au problème, nous pourrions essayer de négocier des traités internationaux, exactement comme on l'a fait

pour réglementer les télécommunications ou le transport aérien. Mais le cyberspace est bien plus complexe. Cela a pris des décennies pour déterminer quelle serait la loi qui s'appliquerait dans telle situation, dans l'aéronautique, le télégraphe ou les télécommunications, et ces industries étaient relativement peu complexes. Tout d'abord, l'idée de cybercriminalité repose sur l'hypothèse que tout le monde considère certains actes comme criminels, ce qui n'est pas le cas. Par exemple, de nombreuses nations ont signé des accords pour protéger les droits des auteurs, musiciens, réalisateurs et autres créateurs, de la même manière qu'on les protège dans leur pays d'origine. Mais certains pays, notamment en ex-Union Sovétique, en Europe de l'Est et en Asie, se sont montrés plus réticents que d'autres à appliquer ces lois sur le copyright. On ne sera pas surpris d'apprendre que ces quelques pays sont les plus grands responsables de la distribution de copies illégales.

Peut-être finirons-nous dans une situation où des cybershérim feront la loi dans les zones de non-droit de l'internet. Peut-être même des cybervigiles endosseront-ils le rôle normalement dévolu de la police. Ce n'est pas un phénomène nouveau, mais au moins les institutions chargées du maintien de l'ordre appliquent-elles aujourd'hui la loi de manière impartiale. Si des justiciers l'outrepassent, ils sont condamnables comme tout un chacun. L'histoire nous enseigne que dans un environnement de non-droit, la vigilance individuelle peut conduire à des situations où le remède est parfois pire que le mal.

Nous sommes donc confrontés à un dilemme intéressant : préférons-nous la vision binaire de la sécurité assurée par

l'intelligence artificielle, ou bien le jugement humain perfectible d'un cybershérif ? Il n'y a pas de solution évidente pour notre future sécurité dans le cyberspace. La seule chose dont vous pouvez être certains, c'est que les criminels s'engouffreront dans tous les interstices où la loi n'est pas appliquée. Nous devons décider collectivement si nous voulons être une population où chacun se charge individuellement de sa propre sécurité, ou bien si nous voulons confier cette sécurité à quelqu'un – ou à quelque chose – d'autre. Le robot Gort ou le shérif Wyatt Earp – à vous de choisir.

10 Intelligence artificielle

Margaret A. Boden

Il est impossible de dire où l'intelligence artificielle (IA) ira dans l'avenir. Mais il est facile de dire où elle n'ira pas : elle ne va pas rester dans son coin. Au contraire, elle sera omniprésente et incontournable.

L'IA est déjà une réalité dans de nombreux secteurs de la société. Elle est au cœur de chaque recherche sur internet et de chaque application. Elle se trouve dans chaque requête GPS, jeu vidéo ou animation d'Hollywood, dans chaque banque, compagnie d'assurances et hôpital – et bien sûr, elle se cache dans chaque montre intelligente et voiture sans chauffeur.

À l'avenir, elle sera partout : dans les tribunaux, les bureaux, les maisons de retraite... et même les conseils matrimoniaux. Les robots martiens auront d'innombrables cousins à l'œuvre dans les entrepôts. L'internet des objets connectera les ordinateurs *wearable* (qui contrôleront notre position géographique, nos niveaux d'activité, notre pression sanguine, etc.) à une foule de gadgets dans nos maisons, au bureau, dans la rue, au restaurant. Ce ne sera pas *Big Brother is watching you*, mais plutôt des milliards de petits frères qui vous surveilleront – et qui tous communiqueront sans discontinuer.

Ces développements sont imminents. En fait, la plupart d'entre eux ont déjà commencé. D'ici une vingtaine d'années, d'innombrables applications de ce genre vont façonner nos vies. Les sociétés industrielles deviendront dépendantes de ces technologies.

Les pays en développement seront aussi concernés avec des conseils médicaux ou agronomiques issus de l'intelligence artificielle, disponibles pour ceux qui vivent à des kilomètres des hôpitaux modernes ou des experts agronomes.

C'est une récente avancée qui a rendu tout cela possible. Il s'agit de l'apprentissage machine basé sur les *big data* : d'immenses volumes d'informations qui peuvent être analysés pour y déceler des motifs récurrents ou des tendances de comportements humains. Appelée *deep learning*, cette technologie d'IA est connue sur le plan théorique depuis plus d'un quart de siècle. Mais elle ne pouvait pas être appliquée parce que les ordinateurs n'étaient pas assez puissants. Or au cours des dernières années, la puissance et la mémoire des ordinateurs ont suffisamment augmenté pour que les machines actuelles (capables d'exécuter un million de milliards d'opérations par seconde) puissent apprendre à partir d'énormes banques de données contenant des milliards d'informations.

Ce type d'apprentissage machine peut découvrir des motifs récurrents à différents niveaux de détail, dans de gigantesques collections d'information. Par exemple, ces volumes de données peuvent comprendre la vitesse et la position actuelle de toutes les voitures et de tous les camions sur le réseau routier d'une ville, avec l'état actuel de tous les feux de signalisation ; ils peuvent concerner les données médicales de tous les hôpitaux régionaux ou nationaux, détaillant pour chaque patient les symptômes, les dosages de médicaments prescrits et les résultats.

Ces systèmes d'IA ne sont pas programmés dans le sens traditionnel avec une suite d'instructions du genre « faire ceci, puis cela ». Ils consistent en des réseaux de neurones multicouches, la

sortie d'une couche étant l'entrée de la suivante. Chaque couche contient plusieurs milliers d'unités. Elles communiquent entre elles jusqu'à ce qu'elles « s'accordent » dans un état qui représente un motif stable trouvé dans les données. Souvent ces motifs sont nouveaux et inattendus – insoupçonnés même des humains qui font tourner le système.

En 2016, une application de cette technologie (développée par Google DeepMind) a suffisamment bien appris le jeu de Go pour battre le champion du monde – un exploit notablement plus ardu que de vaincre le meilleur joueur d'échec au monde (accompli par le programme Deep Blue d'IBM en 1997). Mais il ne s'agissait que d'un jeu. Aussi impressionnante que soit la démonstration, elle n'a pas d'utilité pratique. Il n'empêche, le *deep learning* est déjà exploité dans le monde entier par les gouvernements et par des entreprises qui disposent d'importants volumes de données. À mesure que la technologie sera plus abordable, et donc accessible à un plus grand nombre, elle se répandra dans pratiquement tous les secteurs de la société.

Peut-être pensez-vous que cet exploit au jeu de Go aujourd'hui ouvrira demain la porte à tous les succès. Mais ce n'est pas tout à fait le cas. Les systèmes d'apprentissage actuels sont extraordinairement puissants, mais restent mal compris. Dans le jargon technique ce sont des « boîtes noires » : des systèmes dont on peut connaître les données entrantes et sortantes, mais dont le fonctionnement interne reste obscur. Leurs concepteurs et programmeurs ne comprennent pas vraiment comment marchent ces systèmes, et donc ils ne peuvent pas prédire de manière fiable leurs actions suivantes. Bien sûr, les concepteurs sont conscients du

problème. On y consacre des efforts et des budgets considérables. Mais personne ne sait quand, ni même si ces boîtes noires deviendront un jour grises au point d'être contrôlables (par gris, j'entends quelque part entre le noir et le blanc, ce dernier figurant la situation où l'on comprendrait parfaitement ce qu'ils font). Ceci est probablement une chimère.

Nous devons rester prudents dans notre approche futurologique. Certains développements sont infiniment plus difficiles que ne le pensent la plupart des gens. Un exemple est l'intelligence artificielle *générale* (AGI). C'était l'objectif de la plupart des pionniers de l'IA dans les années 50 – et celui d'Alan Turing avant même cela. Ils espéraient développer des systèmes d'IA comparables à l'intelligence humaine en termes de capacité généraliste et de flexibilité. Un seul et même programme – sans aucun doute extrêmement complexe – serait capable de résoudre toutes sortes de problèmes différents. Il utiliserait – et intégrerait intelligemment – le langage, la vision, l'audition, l'apprentissage et la créativité. Si vous voulez contrôler un robot, vous n'avez qu'à y ajouter des capacités motrices. En d'autres termes, ce logiciel tant désiré devait être très différent des programmes et applications monotâches et super-spécialisés qui nous sont familiers aujourd'hui.

Au départ, l'AGI a suscité de grands espoirs. Un programme de 1959 portait même le nom de « Résolveur général de problème », car il pouvait – en principe – résoudre *n'importe quel* problème formulé en termes de hiérarchie d'objectifs et de sous-objectifs. (Laissée aux soins des programmeurs analystes, la mise en forme du problème constituait en réalité la partie la plus difficile de l'exercice.)

L'un des problèmes auxquels le programme s'attaqua avec succès était le jeu des missionnaires et des cannibales : *trois missionnaires et trois cannibales se tiennent tous sur la même berge d'une rivière, avec un bateau capable de transporter au maximum deux personnes ; le bateau doit toujours avoir au moins un pilote ; comment peuvent-ils passer tous les six de l'autre côté, sans qu'il n'y ait jamais plus de cannibales que de missionnaires sur une berge ?* La solution n'était pas triviale – elle comporte une astuce. (Essayez vous-même avec des pièces de monnaie.) Ce jeu était utilisé pour défier les IA de l'époque, aussi n'est-il pas surprenant que sa résolution par une machine ait soulevé beaucoup d'enthousiasme.

On a consacré de nombreux efforts à l'amélioration et à l'extension du champ d'application de ces systèmes. Mais cela s'est avéré trop difficile. À la fin des années 70, la plupart des chercheurs en intelligence artificielle s'étaient rabattus sur des objectifs plus restreints – par exemple des « systèmes experts » capables de diagnostiquer ou de prescrire des médicaments pour une maladie donnée. Dans le domaine, l'adage était « d'injecter les connaissances du monde dans les programmes d'intelligence artificielle », parce qu'on les nourrissait avec des savoirs factuels (en l'occurrence, sur le diagnostic médical).

À l'heure actuelle, les systèmes experts (un terme passé de mode) sont déclinés en milliers d'exemplaires, utilisés pour des tâches complexes ou triviales. Cela va de la prospection pétrolière à la traduction automatique, en passant par la recherche du restaurant indien le plus proche. Au 21^e siècle, la plupart des recherches en IA ont pour objet des systèmes spécialisés de ce genre. Mais ce n'est

pas le cas de toutes. En effet, l'AGI est à nouveau devenu un objectif respectable. (Le modèle LIDA de la conscience, mentionné ci-dessous, en est un exemple.) Mais aucun système AGI n'est à ce jour réellement « généraliste » au sens où l'entendait Alan Turing.

Les fans du programme Watson d'IBM pourraient néanmoins contester cette affirmation. Ils pourraient dire que l'on maîtrise déjà l'AGI. Après tout, ce programme n'a-t-il pas battu en 2011 deux champions humains au jeu de culture générale Jeopardy ? Dans ce jeu, on ne pose pas de questions directes aux candidats. Ils reçoivent des indices, et il leur est demandé de formuler la bonne question. (Pas « Quelle est la capitale de la France ? », mais peut-être « Une capitale occupée par l'héritière d'un empire hôtelier ».) Ce genre de problème nécessite une pensée latérale – ou tout du moins la capacité de faire des associations très variées.

Les nombreux succès de Watson à Jeopardy sont une authentique réussite, et ses concepteurs ont de quoi être fiers. Cependant, l'intelligence de Watson est très différente de la nôtre. Par exemple il lui est arrivé d'identifier correctement la jambe d'un athlète, mais de passer à côté d'une donnée cruciale : la jambe était manquante. Les concepteurs ont désormais modifié le programme afin qu'il accorde davantage d'importance au mot « manquer », de telle sorte que l'erreur ne se reproduise plus. Mais un être humain sait combien les jambes sont cruciales dans les prouesses athlétiques (comme dans la vie de tous les jours). Il n'aurait jamais commis pareille erreur. La question de la pertinence humaine, ou de la vie humaine, est l'obstacle majeur auquel sont confrontés tous les systèmes d'AG. Dans les grandes lignes, les ordinateurs ne savent pas ce que c'est d'être nous.

En d'autres termes, des tâches ambitieuses pour l'IA/AGI pourraient être tellement difficiles que, même si elles étaient réalisables *en principe* (après tout, le fonctionnement du cerveau humain n'a rien de magique), elles seraient à jamais impossibles *en pratique*.

Cette hypothèse est contestée par ceux qui croient en « la Singularité » – ce moment, que certains scientifiques prévoient dans une vingtaine d'années, où l'IA égalera puis surpassera l'intelligence humaine à mesure que les machines s'amélioreront elles-mêmes, rapidement et intelligemment. (Les prévisions varient : beaucoup de chercheurs voient plutôt la Singularité arriver vers la fin du siècle.) Selon certains croyants en la Singularité, tous nos problèmes importants seront enfin balayés. La guerre, la pauvreté, la famine, la maladie et même la mort seront balayées.

Cette vision est extrêmement controversée. Peut-on réellement penser qu'un quelconque système non humain puisse résoudre les crises politiques au Moyen-Orient, par exemple ? De toute évidence, nous autres humains n'avons pas vraiment excellé à la tâche. Mais que l'IA puisse le faire à notre place, cela demande une foi en la technologie plus solide que celle de beaucoup de gens (dont moi-même) : les sensibilités politiques et le contexte historique sont bien trop complexes et subtils pour que l'IA puisse les saisir.

Il existe un autre scénario futuriste qu'envisagent certains adeptes de la Singularité. C'est celui dans lequel « les robots prennent le contrôle » – avec des conséquences effroyables pour l'humanité. Dans ce scénario, des IA super-intelligentes poursuivraient sans relâche des buts qui leur sont propres, peut-être à notre plus grand détriment. En fait, elles n'auraient pas besoin de

nous nuire (bien qu'elles le pourraient). De même que la plupart des êtres humains sont indifférents au sort des fourmis, les IA super-intelligentes pourraient nous causer du tort, voire nous détruire si nous leur faisons obstacle. Imaginez une IA future conçue pour fabriquer des attache-trombones qui broierait des humains pour en extraire les atomes métalliques – le fer de notre hémoglobine par exemple – afin de produire ces mêmes trombones.

En bref, non seulement les gens se disputent sur la possibilité de la Singularité, mais aussi divergent sur ce point : est-ce une bonne ou une mauvaise chose ? Dans les deux cas l'avenir s'annonce agité. Mais il n'est pas nécessaire de croire en la Singularité pour prédire un avenir palpitant à l'IA. On peut parier sans risque qu'elle ira beaucoup plus loin qu'elle n'est allée jusqu'à présent. Mais jusqu'où, au juste ? Pourra-t-elle passer avec succès le fameux Test de Turing par exemple ? En 1950, Turing a prédit qu'un jour il sera possible de converser avec un programme d'IA pendant cinq minutes sans pouvoir (dans 30% des cas) discerner l'ordinateur d'une personne. Aucune machine n'a encore réussi le test – bien que des gens aient déjà été trompés, ignorant qu'ils étaient potentiellement en conversation avec un ordinateur.

Une compétition sur le Test de Turing, diffusée en direct sur le Web, a lieu chaque année à Bletchley Park, là où Alan Turing participa au décryptage du code de la machine allemande Enigma durant la Seconde Guerre mondiale. Les concurrents espèrent remporter le prix Loebner : 2000 dollars chaque année au « meilleur » programme – 25 000 dollars sont promis au « premier ordinateur dont les réponses ne pourront être distinguées de celles

d'un humain », et 100 000 dollars pour le premier système humanoïde doté de capacités audiovisuelles et verbales.

Les 25 000 dollars n'ont pas encore été attribués. Aucun programme n'a été capable de tromper les juges dans 30% des cas, comme exigé. Certes, la compétition Loebner a été remportée en 2014 par un programme qui s'est fait passer pour un humain face à 33% des examinateurs. Cependant, la personne qu'ils choisirent (parmi une sélection proposée par les organisateurs) était un jeune garçon ukrainien de 13 ans. En d'autres termes, la langue anglaise dans laquelle s'exprimait l'ordinateur était loin d'être parfaite. Ses erreurs et maladresses ont été excusées par ses interlocuteurs humains, de même que nous excusons les erreurs commises par des étrangers, particulièrement les enfants, qui ne s'expriment pas dans leur langue maternelle.

La question qui vient à l'esprit est « et alors ? » Supposons qu'une machine réussisse un jour le test de Turing – ou même ce qu'on appelle le test de Turing complet, qui demande un robot humanoïde avec des capacités sensori-motrices. Qu'est-ce que cela prouverait ? Cela signifierait-il que certains ordinateurs peuvent réellement *penser* ? Cela démontrerait-il qu'ils sont véritablement *conscients* ?

La « conscience » est un concept fuyant. Mais l'on peut toutefois faire une distinction entre la conscience *fonctionnelle* et la conscience *phénoménale*. La première couvre un éventail de contrastes psychologiques. Parmi eux : éveillé/endormi, délibéré/étourdi, attentif/distract, accessible/inaccessible, descriptible/indescriptible, réfléchi/inconsidéré, et ainsi de suite.

Ce sont des contrastes fonctionnels. Il y a de bonnes raisons de croire qu'ils peuvent être compris en termes de processus informatiques, et donc être modélisés dans des ordinateurs. (Le modèle le plus intéressant de conscience dans une machine est à l'heure actuelle le modèle LIDA, qui cherche à reproduire ces mêmes contrastes, et qui repose sur une théorie largement acceptée du fonctionnement du cerveau.) En ce sens, les futurs systèmes d'IA pourraient être conscients. Par exemple, on pourrait à juste titre dire qu'un robot vainqueur du test de Turing pense et planifie.

La conscience phénoménale, ou *qualia* (comme la douleur ou encore la sensation de la couleur rouge), semble d'une tout autre nature. Dans un univers fondamentalement matériel, son existence même est une énigme métaphysique notoire. L'explication de la conscience phénoménale est parfois désignée sous l'appellation du « problème difficile », parce que la résoudre est tellement plus complexe que d'expliquer la possibilité de la conscience fonctionnelle.

Plusieurs thèses hautement spéculatives, apparemment délirantes, ont été avancées pour expliquer les qualia. Certaines traitent la conscience phénoménale comme une propriété irréductible de l'univers, au même titre que la masse ou la charge électrique. (Cela ne résout en rien notre problème, bien sûr !) D'autres font appel à la physique quantique – ils recourent à un mystère insondable pour tenter d'en expliquer un autre. Et beaucoup lèvent simplement les bras en signe d'impuissance. Un philosophe célèbre a déclaré que non seulement personne n'avait « la plus petite idée de comment il est possible que quoi que ce soit de matériel puisse avoir une conscience », mais aussi que « personne

ne sait même ce que cela voudrait dire, d'avoir la plus petite idée de comment il est possible que quoi que ce soit de matériel puisse avoir une conscience ». En bref, le sujet est un borbier philosophique.

Si la conscience phénoménale est si mystérieuse, nous sommes mal placés pour juger si un futur système d'IA pourrait en avoir une. Je vous l'accorde, cette suggestion peut sembler ridicule. Elle l'est d'ailleurs à mes yeux. Mais il s'agit là d'une intuition non argumentée, et non d'une conclusion rigoureusement raisonnée.

La plupart des chercheurs en IA – les programmeurs de LIDA en particulier – ignorent la conscience phénoménale. Ils la considèrent comme trop complexe. Mais quelques philosophes inspirés par l'IA l'examinent en termes d'analyse de l'information.

De ce point de vue, les qualia sont des états informatiques internes – au sein du programme, ou de la « machine virtuelle », qui s'exécute dans le cerveau. Ces états peuvent avoir des effets sur notre comportement (par exemple, des expressions involontaires du visage). Ils peuvent aussi entraîner des changements dans d'autres aspects du traitement de l'information par l'esprit (par exemple planifier une vengeance si quelqu'un vous a fait du mal). Ils ne peuvent exister que dans des systèmes de calcul d'une grande complexité structurelle. (Ainsi les escargots en sont probablement dénués.) On ne peut y accéder que depuis d'autres parties du système concerné, d'où leur caractère « privé ». En outre ils ne peuvent pas toujours être exprimés – à des niveaux de l'esprit plus élevés où l'on est conscient de soi – sous forme verbale, d'où leur caractère « ineffable ». En un mot : « Vous ne pouvez pas faire l'expérience de *ma* sensation de la couleur rouge. Et je ne peux pas vous la *décrire* explicitement (pas plus qu'à moi-même). »

Si une telle caractérisation des qualia est correcte, alors certains systèmes futurs d'IA pourraient avoir une conscience phénoménale. Sur cette question le jury continue de délibérer.

Le jury poursuit également ses délibérations pour savoir si l'IA *est* – ou devrait-on dire *sera* – une bonne chose. À cette question, les partisans de la Singularité, mentionnée plus haut, répondent en chœur par une retentissante affirmative. Même si l'on doute (comme moi) que la Singularité advienne un jour, il faut reconnaître que l'IA actuelle nous rend de nombreux services – et cela sera encore plus vrai à l'avenir. Cela est au moins une certitude.

Dans cette mesure, on peut qualifier l'IA de « bonne chose ».

Néanmoins le futur de l'IA n'est pas dénué d'aspects inquiétants – certains d'entre eux devraient du reste nous préoccuper sérieusement dès à présent. Un exemple évident est la menace sur l'emploi : non seulement le nombre de postes de travail (qualifiés et non qualifiés), mais aussi leur dévaluation, à mesure que les machines prennent le relais pour les aspects les plus routiniers du travail. Idéalement le travail sera restructuré de telle sorte que les êtres humains travailleront côte à côte avec les machines : les gens feront ce que seuls des gens peuvent faire, abandonnant le reste à l'intelligence artificielle. Il n'empêche que de nombreuses personnes chargées de tâches ennuyeuses auront du mal à retrouver un emploi. Pour s'en assurer, on créera de nouveaux types de travail. Mais ils demanderont sans doute un niveau de formation largement hors de portée pour la majorité de la population, même dans les sociétés les plus avancées.

Certains disent qu'en soi, l'emploi n'a pas d'importance. Les salaires, expliquent-ils, seront remplacés par un « revenu universel

de base », auquel aura droit chaque citoyen. (Des expériences sont en cours ou prévues dans différents pays.) Mais cela ne va pas sans soulever toutes sortes de questions. D'où proviendront les rentrées fiscales à l'origine de telles largesses sociales ? Et que feront les gens avec tout ce temps de loisirs ? Les psychologues sociaux ont montré qu'un travail, même peu qualifié, apporte bien plus qu'une rétribution financière.

Un autre exemple, ou ensemble d'exemples, concerne le militaire. Des drones lâchent déjà des bombes, mais c'est un humain qui sélectionne les cibles. Dans un avenir de cauchemar, nous verrions des drones entièrement autonomes dont les cibles seraient choisies par des machines. Cette question est abordée dans ce livre par Noel Sharkey au [chapitre 15](#).

Il existe enfin de nombreuses activités où l'IA pourrait être introduite, qui impliquent aujourd'hui des communications empathiques entre humains. Des sommes considérables sont consacrées à la recherche et au développement d'ordinateurs-soignants, d'ordinateurs de compagnie et de « robots-nounous ».

Cela ne pose pas de problème tant que le robot-nounou est simplement un système pour contrôler les cycles de sommeil de bébé, s'il dort ou s'il pleure, et qu'il alerte la personne en charge. Mais s'il s'agit d'une machine dotée de capacités de langage naturel, chargée de distraire et d'éduquer l'enfant, alors il n'y a pas de quoi se réjouir. Le simple visionnage de *Bambi* peut soulever de gros problèmes : qu'est-ce que le robot-nounou va expliquer à l'enfant quand la maman est tuée ?

De même, si à l'avenir les maisons de retraite emploient des systèmes d'IA (via des écrans, ou avec des robots) afin de prendre

en charge des tâches pratiques pour les personnes âgées, c'est parfait. Mais entrer en conversation avec elles, leur rappeler des souvenirs chargés d'émotion : cela pourrait faire beaucoup plus de mal que de bien. (Bien sûr, dans un monde idéal, de telles applications d'IA ne seraient pas même envisagées. Le personnel soignant serait bien mieux payé et respecté qu'aujourd'hui. Les amis et les proches de la personne âgée prendraient la peine de lui rendre visite. Mais souhaitez-vous simplement attendre que cela arrive ?)

Dans le monde entier, de nombreuses équipes réfléchissent maintenant à tous ces problèmes, et cherchent des solutions pratiques pour les prévenir, les améliorer et les réguler. L'un de ces groupes, par exemple, est un comité international présidé par un roboticien qui suit et conseille le développement des robots militaires (comme les drones). D'autres rassemblent des professionnels de l'IA et des décideurs publics qui examinent l'utilisation des *big data* dans divers domaines, et veillent à la protection de la vie privée par exemple.

En conclusion, il faut que nous nous attendions à des bouleversements. Les développements de l'IA seront nombreux à améliorer significativement notre quotidien. Mais ils entraîneront aussi des conséquences involontaires (bien que parfois prévisibles) qui pourraient menacer des aspects importants de la vie humaine. Nous ne devrions pas totalement lâcher la bride à la recherche en intelligence artificielle.

11 Ordinateurs quantiques

Winfried K. Hensinger

Quand j'ai grandi au début des années 80, les ordinateurs commençaient tout juste à être des objets courants. J'ai appris à taper du texte sur une machine à écrire mécanique, et la vie en général était bien différente – pas de distributeurs automatiques de billets dans les gares, pas d'internet, pas de smartphones. En fait, les tâches quotidiennes ne reposaient pas sur les ordinateurs et de nombreuses choses qui aujourd'hui semblent aller de soi n'existaient tout simplement pas. À présent, les ordinateurs conventionnels ont investi presque tous les aspects de notre quotidien, et nous n'imaginerions pas vivre sans eux. Les scientifiques et les responsables politiques ont inventé un qualificatif pour les technologies qui bouleversent nos vies : on les dit « disruptives ». Le terme est appliqué quand une technologie revêt le potentiel de transformer nos vies d'une manière radicale, abrupte et englobante. Au cours des dix ou vingt prochaines années, j'imagine, nous allons assister à l'émergence d'une autre technologie disruptive : l'informatique quantique.

Précisons tout de suite ce point : les ordinateurs quantiques ne se résument pas à leur vitesse. En fait, ils ont peu de traits communs avec les ordinateurs conventionnels, et il est peu probable qu'ils soient utilisés pour les tâches que nous confions à l'informatique d'aujourd'hui. En revanche ils pourraient nous permettre d'arriver au bout de certains problèmes que nous n'aurions même jamais pensé

résoudre : des problèmes d'un genre particulier, qui prendraient des milliards d'années aux supercalculateurs les plus rapides. Les ordinateurs quantiques ouvriront certainement des possibilités entièrement nouvelles. En conséquence, ils changeront nos vies de manière imprévisible. Pour se faire une idée de quelques-unes de ces possibilités et imaginer comment ces ordinateurs vont bouleverser nos vies, le mieux est de commencer par le commencement et de décrire les principes de fonctionnement d'un ordinateur quantique. Permettez-moi de démarrer avec une petite introduction à la physique quantique.

La physique quantique est une théorie qui explique le monde autour de nous. Mais elle est assez étrange. En premier lieu, elle prédit que quelque chose peut être en deux endroits à la fois. Oui, vous avez bien lu : la physique quantique, en principe, me permet d'être simultanément assis à mon bureau de Brighton en train d'écrire ce chapitre, et sur une plage de Floride, en train de barboter. Malheureusement, cela n'arrive pas avec de gros objets comme les personnes. (En ce moment même, j'aimerais bien que ce soit le cas !) Mais en laboratoire on observe régulièrement ce phénomène quand on étudie le comportement d'atomes individuels. En effet, un atome peut être à deux endroits différents au même moment. Ce phénomène s'appelle la « superposition ». Stupéfaits par cette singulière prédiction de la physique quantique, les physiciens ont tenté de l'invalider avec d'innombrables expériences. Mais les unes après les autres, elles montraient non seulement que cela pouvait arriver, mais aussi que cela arrivait.

Laissez-moi vous raconter une étrangeté quantique tirée de ma propre carrière scientifique. Un physicien quantique du nom de

Gerard Milburn avait prédit qu'il devait être possible de faire avancer et reculer un même atome, en même temps. Pour bien comprendre l'idée, imaginez-vous dans votre voiture. Vous tentez de sortir d'un stationnement exigü, et plutôt que d'avancer et percuter le véhicule devant vous, puis reculer et percuter celle de derrière, vous rentrez dans les deux voitures à la fois – en même temps ! Dans ma jeunesse, cette idée me fascinait au plus haut point. Aussi j'ai voulu tenter cette expérience au début de ma carrière scientifique. Après environ trois ans de travail et de longues nuits passées au laboratoire, c'est exactement ce que nous avons observé : un atome qui avançait et reculait en même temps. C'est un exemple de superposition quantique.

Comme si la superposition n'était pas assez étrange, il y a plus extravagant ! Il existe un phénomène encore plus déroutant, appelé « intrication ». En fait, la seule façon d'expliquer correctement l'intrication requiert des équations mathématiques. Essayons cependant d'en donner un aperçu simplifié. Il est possible d'intriquer deux objets quantiques, par exemple deux atomes, de sorte que si j'interviens sur l'un des atomes cela influence instantanément le second, même s'il est à une très grande distance du premier et n'a aucun moyen de communiquer avec lui. Einstein était très mal à l'aise avec cet aspect de la physique quantique. Il la qualifiait d'effroyable et a proposé des expériences pour l'invalider. Les physiciens ont réalisé de telles expériences pendant soixante ans, ils les ont perfectionnées, à l'affût toutes les possibilités d'erreurs imaginables. Mais les résultats sont restés les mêmes : la mécanique quantique semble correcte et de curieux phénomènes surviennent, comme la superposition et l'intrication.

Tandis que certains physiciens cherchent encore à comprendre l'étrangeté de la physique quantique, beaucoup d'autres l'ont simplement acceptée et se sont tournés vers un nouveau défi. Ils se demandent s'il est possible d'exploiter ces effets pour construire des technologies entièrement nouvelles qui s'appuieraient sur les étranges prédictions de la physique quantique. Les idées sont nombreuses. On songe à une prochaine génération de capteurs qui pourraient détecter des champs électromagnétiques avec une précision sans précédent, ou même mesurer la gravité elle-même (ce qui permettrait par exemple de révéler la présence de tuyaux dans le sol). D'autres applications incluent la cryptographie quantique pour échanger des informations en totale sécurité, sachant que les lois de la physique elles-mêmes protégeraient à jamais la confidentialité de nos communications.

Toutes ces technologies sont extrêmement enthousiasmantes. Elles pourraient considérablement changer nos vies. Mais à mon avis, l'application la plus radicalement disruptive (et la plus difficile à réaliser) est l'informatique quantique. Laissez-moi vous expliquer en quoi il s'agirait d'une machine si puissante et novatrice.

La mécanique quantique explique comment les atomes se comportent et interagissent pour générer toutes les propriétés de la matière dans l'univers, comme la couleur d'un objet, sa force, la façon dont il conduit la chaleur et l'électricité. Elle explique aussi comment les atomes réagissent dans notre corps et comment tout cela détermine ce que nous voyons et sentons, ou l'expérience que nous faisons du monde autour de nous. C'est une théorie extraordinairement puissante.

Mais nous faisons face à un gros problème : il est très difficile de prédire et de calculer des processus quantiques à l'aide d'ordinateurs classiques. En fait il est pratiquement impossible de résoudre avec exactitude la plupart des problèmes de mécanique quantique, même avec les ordinateurs conventionnels les plus puissants. La physique quantique requiert une considérable capacité de calcul. Les ordinateurs actuels auraient besoin de milliards d'années pour calculer la solution de nombreux problèmes réellement intéressants. S'il fallait résumer le travail de la majorité des scientifiques de par le monde, nous pourrions dire qu'ils créent des modèles très simplifiés de processus quantiques afin qu'ils puissent être traités par un ordinateur conventionnel. Mais comparés à la solution exacte de ces processus, ces calculs sont inévitablement approximatifs. Ils ne peuvent pas toujours modéliser les processus avec précision. Cela a pour conséquence que nous ratons des occasions extraordinaires de créer de nouveaux médicaments et matériaux, de comprendre le pliage des protéines ou de mieux saisir et contrôler des processus biologiques, pour ne mentionner que quelques applications. Un ordinateur quantique pourrait être capable de calculer de tels problèmes parce qu'il reposerait directement sur les propriétés étranges de la mécanique quantique. En tant que tel, il pourrait simuler avec précision des systèmes complexes fondés sur la physique quantique ! Nous réalisons tout juste certaines conséquences majeures de l'utilisation future des ordinateurs quantiques. Savons-nous déjà quelles seront les plus importantes innovations qui résulteront de l'informatique quantique pour comprendre et contrôler les autres systèmes physiques ? Malheureusement nous ne pouvons que spéculer.

Toutefois, puisque tous les systèmes physiques et leurs diverses propriétés peuvent être expliqués par la physique quantique, il n'est pas nécessaire d'avoir un doctorat pour comprendre que les perspectives pourraient être illimitées. L'utilisation d'ordinateurs quantiques pour saisir la réalité elle-même est une approche révolutionnaire. Elle pourrait changer du tout au tout notre compréhension de l'univers et de la vie elle-même.

Cela seul fournit déjà matière à s'emballer. Mais il existe une deuxième application des ordinateurs quantiques qui pourrait avoir une tout aussi grande conséquence sur nos vies. Pour le comprendre, le mieux est de commencer par quelques explications sur les ordinateurs conventionnels. La puissance de calcul de nos ordinateurs a régulièrement augmenté au cours des trente dernières années. Elle a grosso modo doublé tous les dix-huit mois – une progression connue sous le nom de loi de Moore. Nous y sommes parvenus en miniaturisant les transistors qui composent le microprocesseur, au cœur de l'ordinateur. Cette amélioration continue de la puissance de calcul semble impressionnante. Mais certains problèmes sont si complexes que même les meilleurs ordinateurs disponibles demanderaient bien trop de temps pour calculer la réponse. Par exemple, s'il s'agit d'établir des prédictions météorologiques précises, ou de savoir quel est l'investissement boursier le plus intelligent pour maximiser son profit. Une autre application pourrait être de déterminer le circuit le plus rapide pour une société de transport qui effectue plusieurs livraisons au cours d'un même trajet. Le nombre de variables pour modéliser le problème se multiplie à mesure qu'augmente sa taille (le nombre de livraisons, ou l'étendue des prévisions météorologiques). Les

ordinateurs conventionnels ont du mal à terminer le travail à cause de l'énorme puissance de calcul nécessaire.

La réponse réside peut-être dans les ordinateurs quantiques. Dans un ordinateur conventionnel (que nous qualifierons de « classique » pour le distinguer de son homologue quantique) l'information est encodée à l'aide d'éléments binaires, appelés bit : chacun a une valeur de zéro ou d'un. Une chaîne de bits représente alors de l'information qui sera traitée par le processeur, par exemple un nombre. Prenons l'exemple de deux bits. Nous pouvons écrire dans la mémoire de notre ordinateur n'importe quelle combinaison de deux bits, par exemple nous pourrions choisir 01 (le nombre binaire « un ») et 10 (le nombre binaire « deux »). Les deux nombres sont ensuite envoyés au microprocesseur et additionnés. Une fois la réponse calculée, nous la reportons dans la mémoire à 2 bits – dans ce cas 11 (qui représente le nombre « trois ») – puis nous l'utilisons dans l'opération suivante afin de nous donner la prochaine réponse. Ce qui caractérise le fonctionnement d'un ordinateur classique, c'est que les opérations sont effectuées séquentiellement, l'une après l'autre. Par contre, un ordinateur quantique peut exploiter le principe de superposition. Cela veut dire que deux bits quantiques peuvent représenter simultanément toutes les combinaisons de deux bits, soit les quatre nombres 0, 1, 2, 3 (écrits en binaire sous la forme 00, 01, 10 et 11). De plus, le microprocesseur quantique effectue tous les calculs en même temps ! Une interprétation de la physique quantique voudrait même que ces calculs soient effectués dans des univers parallèles. Si l'on compare deux bits classiques avec deux bits quantiques, la différence entre l'ordinateur classique et son correspondant quantique ne semble pas tellement significative (par

exemple, quatre nombres sont calculés dans un ordinateur quantique au lieu d'un seul dans un ordinateur classique). Mais si on augmente le nombre de bits, la différence s'accroît rapidement. Dix bits quantiques représentent déjà simultanément 1024 nombres, et cent bits quantiques 1 267 650 600 228 229 401 496 703 205 376 nombres différents – tous en même temps. Alors qu'un ordinateur quantique peut les calculer simultanément, un ordinateur classique devrait procéder nombre après nombre. On comprend maintenant pourquoi les ordinateurs quantiques sont si puissants.

Cependant, il convient de mentionner un détail d'importance. S'il est vrai qu'un ordinateur quantique peut faire tous ces calculs en une seule fois, on ne peut pas lire toutes les réponses. En fait, on ne peut lire qu'une seule réponse. Il existe néanmoins un moyen de passer outre cette limitation. Il est possible de s'assurer que cette réponse dépend de tous les calculs – qu'elle les utilise tous. Donc, pour tirer parti des possibilités du calcul quantique, nous devons nous restreindre à des problèmes où nous sommes intéressés par une solution qui dépend de nombreux calculs ou opérations individuels. Les requêtes dans les bases de données sont de ce genre. Imaginez que vous recherchez le nom associé à tel numéro de téléphone dans un annuaire. En moyenne vous devrez vérifier la moitié des entrées de l'annuaire avant de trouver le propriétaire du numéro. Parfois vous aurez de la chance et le trouverez rapidement. D'autres fois il sera plus proche de la fin, mais en moyenne – après de nombreuses recherches de différents noms – vous aurez lu la moitié du bottin. C'est exactement le genre de problème dans lequel pourraient exceller les ordinateurs quantiques. Les algorithmes de recherche sont en effet parmi les applications où les ordinateurs

quantiques permettraient une accélération significative de la vitesse de traitement en comparaison des ordinateurs classiques. La création d'algorithmes conçus pour les ordinateurs quantiques est en train de devenir une discipline en soi – et nous n'en sommes qu'au début. De manière encourageante, on en a déjà écrit de très puissants (voir la liste des algorithmes quantiques connus sur le site web du NIST *Quantum Algorithm Zoo*).

Mais pratiquement, comment fait-on pour construire un ordinateur quantique ? Malheureusement c'est incroyablement difficile, et pendant des décennies les scientifiques pensaient que cela n'était pas même faisable. Or ces dernières années, les points de vue ont évolué suite à de nombreuses avancées. Je pense qu'on peut honnêtement affirmer qu'à la lumière de nos connaissances, il est possible de construire un ordinateur quantique avec les technologies actuelles. Certes si l'on considère l'ingénierie requise, le projet s'annonce aussi compliqué et ambitieux qu'un vol habité vers Mars. Mais regardons d'un peu plus près quels sont ces prérequis.

Le composant le plus important est un système physique présentant des effets quantiques, puisque nous voulons tirer parti de phénomènes de superposition et d'intrication pour faire fonctionner la machine. La bonne nouvelle est que cela nous laisse une certaine latitude : en principe n'importe quel système physique manifeste des comportements quantiques. Effectivement, quand on a commencé à envisager des ordinateurs quantiques, les scientifiques ont proposé de nombreux systèmes physiques. La liste inclut des plaquettes de silicium dont la surface présenterait des impuretés sous forme d'atomes d'autres éléments qui figureraient des bits quantiques

individuels, des électrons isolés flottants dans l'hélium, des atomes chargés (des ions), des circuits supraconducteurs, des photons et de beaucoup d'autres systèmes. On a exploré d'innombrables idées.

Même si tous ces systèmes présentent certainement des effets quantiques, il est difficile de les contrôler pleinement – il s'agit de provoquer ces effets à la demande. Si les physiciens ont une longue expérience dans l'observation des phénomènes étranges de la mécanique quantique, les contrôler reste extrêmement complexe. Une des raisons est que la moindre interaction involontaire détruira immédiatement ces effets (c'est d'ailleurs pourquoi nous ne voyons pas les plus grands objets, comme les personnes, simultanément en deux endroits différents). Beaucoup de systèmes sont à l'étude et pourraient fournir une architecture fantastique pour les ordinateurs quantiques du futur. Mais deux candidats principaux se sont distingués par d'impressionnants progrès. À tel point que nous pensons désormais possible de construire des ordinateurs quantiques à grande échelle.

L'un des candidats utilise le phénomène quantique appelé supraconductivité. Pour qu'un tel ordinateur quantique puisse fonctionner, il doit être refroidi à une température proche du zéro absolu ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). C'est tout à fait faisable quand on travaille sur seulement quelques bits quantiques, mais avec des milliards le défi d'ingénierie devient bien plus complexe.

L'autre candidat est le système physique qui présente les meilleures caractéristiques à ce jour. Il s'agit d'ions piégés (des atomes électriquement chargés) qui pourraient s'activer à température ambiante et donc nécessiter un refroidissement relativement « modeste » (à $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, la température de liquéfaction

de l'azote). Il y a seulement quelques mois, mon groupe à l'université du Sussex a publié – avec l'aide de scientifiques hors pair de Google, de l'université d'Aarhus, de l'institut Riken au Japon et de l'université de Siegen – le tout premier schéma de construction d'un ordinateur quantique à grande échelle reposant sur les ions piégés. Et nous sommes en train d'assembler un prototype à l'université du Sussex.

Examinons comment il est possible de construire un ordinateur quantique en utilisant des ions piégés. Chaque ion représente un bit quantique. Les ions sont captifs dans le vide afin de s'assurer que les atomes qui forment les bits quantiques n'entrent pas en collision ni n'interagissent avec les autres atomes du système. Les ions sont maintenus en place à l'aide de champs électriques émis par des électrodes situées sur des micropuces spécialement conçues à cet effet. Sur les micropuces, les électrodes sont disposées en rangs entrecroisés et forment un vaste labyrinthe à l'image d'un jeu de Pacman, dans lequel les ions peuvent être déplacés en changeant la tension des électrodes. Les ions sont manipulés à la surface, et vont des zones mémoire vers les portes quantiques, où sont réalisées des opérations logiques quantiques (les calculs proprement dits). Typiquement, on fabrique chaque porte quantique avec une paire individuelle de rayons laser ajustés au micromètre. Pour effectuer les calculs, il nous faudrait donc presque autant de paires de rayons laser qu'il y a de bits quantiques – soit potentiellement des milliards. On a démontré la faisabilité de cette technique avec une poignée d'ions, mais imaginez seulement comment concevoir une machine quantique qui comprenne des milliards de paires de faisceaux laser, qui contrôlent des milliards d'ions.

Par chance, nous avons récemment développé une nouvelle approche où les rayons laser sont remplacés par des tensions électriques appliquées sur une micropuce. Cela réduit considérablement la difficulté de conception de l'ordinateur quantique à grande échelle. Dans le schéma de construction, nous nous sommes efforcés d'offrir une bonne vue d'ensemble de toutes les tâches d'ingénierie requises. Afin de ne pas dépendre de découvertes futures en physique, et ainsi de pouvoir affirmer que nous sommes maintenant capables de construire un ordinateur quantique, la machine que nous envisageons ne sera pas aussi optimisée qu'elle pourrait l'être ; elle sera très coûteuse, très grande (de la taille d'un immeuble, peut-être même d'un terrain de foot), et sa construction devrait durer entre 10 et 15 ans. Cependant, aucun obstacle manifeste de la physique fondamentale ne semble nous empêcher de créer cette machine. Avec ce qui vient d'être dit, il est évident que l'ordinateur quantique domestique reste une vision lointaine. Mais cela n'a sans doute aucune importance. Après tout, les premiers ordinateurs conventionnels n'étaient pas non plus très compacts ; eux aussi remplissaient tout un immeuble. À l'âge de l'informatique dans le cloud, il semble bien plus naturel d'avoir un ordinateur quantique centralisé, auquel les utilisateurs accèdent à distance pour effectuer leurs calculs.

Quel chemin nous reste-t-il avant que ne soit construit un ordinateur quantique commercial ? L'entreprise canadienne D-Wave a pris une décision audacieuse et vend déjà sa propre technologie comme étant un ordinateur quantique. De nombreux physiciens ont accueilli ces déclarations avec scepticisme. Des études récentes semblent confirmer que certains processus quantiques jouent bel et

bien un rôle dans le fonctionnement de la machine de D-Wave. Cependant je n'ai pas encore eu la preuve que ces machines pourraient devenir des ordinateurs quantiques universels – au sens où elles seront capables de prendre en charge l'ensemble des applications que l'on attend d'un ordinateur quantique. Les bits quantiques exploités à l'intérieur de la machine de D-Wave n'ont pas les mêmes capacités que par exemple les bits quantiques dans un ordinateur à ions piégés. Aussi, les dispositifs de D-Wave peuvent-ils être considérés comme des machines dédiées sans la flexibilité nécessaire pour devenir des universelles – c'est-à-dire des ordinateurs ? Cela ne semble pas très impressionnant mais il pourrait bien y avoir quelques applications intéressantes à ces machines.

Construire un ordinateur quantique à grande échelle est considéré comme un des Graals de la science. En même temps, plusieurs entreprises d'informatique ont manifesté un intérêt pour le développement de l'informatique quantique, conscientes que l'acquisition de compétences dans le domaine peut se révéler critique pour leur avenir – parmi elles on compte IBM, Google ou Microsoft ainsi que des start-up comme IonQ. Il y a également de nombreuses universités qui travaillent à la construction et à la commercialisation d'ordinateurs quantiques. Il semble juste de dire que nous avons levé la plupart des obstacles fondamentaux qui barraient la route à l'ordinateur quantique. Cependant le défi d'ingénierie reste pour le moins audacieux. C'est pourquoi les premières machines à grande échelle ne seront vraisemblablement pas une réalité avant une ou deux décennies. D'ici là de nombreuses nouvelles solutions apparaîtront dans le sillage de cette

quête. Cette technologie peut potentiellement bouleverser le monde. Nous avons la chance extraordinaire d'appartenir à une génération qui va probablement faire l'expérience de quelques-unes de ses merveilles.

CRÉER L'AVENIR

Ingénierie, transports et énergie

12 Matériaux intelligents

Anna Ploszajski

Imaginez ce que serait la vie si les objets autour de nous pouvaient sentir, réagir, bouger, s'adapter, changer de forme et se réparer tout seuls. À l'avenir, ce sera une réalité : les objets rempliront des fonctions utiles pour nous. Ils le feront sans intervention humaine, sans robotique ni électronique, mais grâce aux « matériaux intelligents » : des solides dont les propriétés – couleur, forme ou magnétisme – changent automatiquement avec des stimuli comme la lumière, la température, l'humidité ou les forces appliquées. Ce sujet embrasse un vaste domaine. De notre vivant, nous verrons les matériaux intelligents s'imposer partout, sur les toits des bâtiments qui changeront de couleur pour réguler la température, sur nos vêtements, comme enveloppe de robots humanoïdes et même comme boîtes de conserve auto-ouvrantes.

Les matériaux intelligents ne sont pas nouveaux. La nature nous a précédés avec par exemple les pignons du pin qui se referment quand il pleut ou les plantes qui poussent en direction du soleil. Nous en avons nous-mêmes employé au cours de notre histoire : il y a 4500 ans, les pyramides de Gizeh étaient recouvertes d'un mortier de chaux qui se réparait tout seul. Mais c'est en 1880 qu'un matériau intelligent fut reconnu comme tel pour la première fois. Il a été découvert par les frères Pierre et Jacques Curie, respectivement mari et beau-frère de Marie Curie. Ils ont observé qu'en comprimant un cristal de quartz – un minéral transparent

courant qu'on trouve dans le granite – on provoquait l'apparition d'une tension électrique. L'année suivante ils ont montré que l'effet était réversible – le cristal se déformait physiquement si on lui appliquait une tension électrique. Ils donnèrent à cet effet le nom de *piézoélectricité*, du grec *piezo*, compresser, et *elektron*, ambre – une ancienne source de charge électrique. On a utilisé les cristaux piézoélectriques pour la première fois dans des dispositifs de détection par sonar durant la Première Guerre mondiale ; aujourd'hui, ils connaissent de multiples applications des briquets aux microphones en passant par les horloges ou l'échographie.

L'innovation des frères Curie a inspiré scientifiques, ingénieurs et inventeurs, qui ont repensé leur approche de la conception des matériaux. Ils ont ainsi découvert tout un catalogue de nouveaux matériaux intelligents. Aujourd'hui des millions d'inventions brevetées en font l'usage. Dans les grandes lignes, leurs fonctions peuvent être classées en six catégories : changement de couleur, détection, mouvement, variation de la température, autoréparation et changement de phase (solide/liquide). Ces matériaux ne sont en aucun cas relégués aux domaines de la science-fiction ou du laboratoire. Nous sommes pour la plupart déjà familiarisés avec certains d'entre eux, comme les lunettes de soleil photochromiques qui s'assombrissent à la lumière ou les tasses thermochromiques qui changent de couleur quand elles sont remplies de café brûlant.

La bicyclette intelligente du futur vous promet des escapades sans soucis : grâce aux matériaux intelligents, les nids-de-poule, les crevaisons et les éraflures appartiendront au passé. Vous pourrez faire du vélo par n'importe quel temps avec des vêtements qui s'adapteront rapidement à la température corporelle ou à la pluie. Si

vous vous laissez surprendre par la tombée de la nuit, les routes s'illumineront sous le poids des véhicules qui passent. Si vous chutez votre combinaison intelligente s'autoréparera sur le bas-côté.

Pour un plus long voyage, vous monterez à bord de l'avion du futur, plus proche de l'oiseau que des machines actuelles. Ces avions changeront de forme pour s'adapter aux conditions de vol et offriront aux passagers le trajet le plus fluide qui soit. Ils battront des records de vitesse en utilisant moins de carburant, tout cela grâce aux matériaux intelligents. Le futur du monde des matériaux s'annonce passionnant.

Votre humble bicyclette

À cause de l'obsolescence programmée – quand les industriels brident intentionnellement la durée de vie de leurs produits pour encourager de nouveaux achats – et des objets conçus pour n'être pas réparables, notre culture s'oriente toujours plus vers le consumérisme et le jetable. Malgré sa conception universelle et ses composants délibérément remplaçables, même notre bicyclette finira avec la peinture écaillée, des parties rouillées et des pneus vannés. Mais à l'avenir les matériaux intelligents la sauveront de la casse.

La peinture autoréparante contient un agent de restauration : de la résine confinée dans de petites microsphères qui se rompent là où la surface a été abîmée. Quand la résine est relâchée, elle remplit l'éraflure et répare le dommage. On pourrait concevoir des pneus autoréparants à partir de caoutchouc vulcanisé modifié, où des particules chargées (des ions) s'alignent sur les chaînes moléculaires. Composées de molécules adjacentes avec des

charges opposées, les parties s'attirent et forment de solides liaisons pour un matériau plus robuste et durable. Si une déchirure de la gomme sépare les molécules, elles reforment spontanément leurs liaisons simplement parce que leurs charges opposées s'attirent. Aujourd'hui, les pneus increvables contiennent une pâte collante sous la bande de roulement qui remplit les perforations. Mais le caoutchouc intelligent autoreparant est différent : il s'agit d'un matériau unique qui peut se réparer plusieurs fois.

Aujourd'hui, laissez un vélo sous la pluie et rapidement la rouille s'attaquera aux parties exposées. Quand cela se produit, la surface des métaux devient plus alcaline. Les matériaux intelligents halochromiques changent de couleur quand le pH de leur environnement varie, un peu comme du papier tournesol qu'on pourrait peindre. Un exemple type est la phénolphtaléine, qui vire au rose dans des conditions alcalines. Sur une bicyclette, un ouvrage d'art ou n'importe quel objet, ces revêtements halochromiques permettraient une détection et un traitement précoce de la corrosion avant que ne surviennent des dommages plus graves.

La NASA est allée encore plus loin dans les revêtements anticorrosion. Elle a développé une peinture intelligente qui non seulement identifie la rouille mais aussi arrête sa formation. Elle comprend des microcapsules qui libèrent des inhibiteurs gras quand l'alcalinité augmente. Un tel moyen de prévention de la rouille aurait des conséquences économiques importantes pour les pays – étonnamment le coût de la corrosion au Royaume-Uni représente à lui seul 3% du PIB, soit environ 60 milliards de livres par an.

Nous serons peut-être bientôt redevables aux frères Curie et à leurs matériaux intelligents piézoélectriques pour l'éclairage urbain,

les panneaux de signalisation ou les feux de circulation qui pourraient tirer leur énergie de la chaussée elle-même. Aujourd'hui, le matériau piézoélectrique le plus courant est une céramique artificielle appelée titanate zirconate de plomb. Ce matériau produit une tension électrique quand il est compressé parce que ses atomes sont arrangés en structure cristalline asymétrique. Pour la plupart d'entre nous, le cristal évoque une jolie pierre brillante et transparente. Mais pour un scientifique en matériaux, les cristaux sont des solides dans lesquels les atomes forment des rangées ordonnées qui génèrent une structure tridimensionnelle régulière. En fait la plupart des pierres précieuses sont des cristaux. Mais les métaux, les céramiques, la glace, les roches et même certains plastiques sont également formés de cristaux. La plupart des cristaux sont composés d'atomes alignés d'une façon répétitive et symétrique : le motif apparaît de manière identique quel que soit le côté où se trouve l'observateur. Dans les cristaux piézoélectriques, les atomes sont arrangés en unités asymétriques. En condition normale, les charges électriques des atomes se compensent les unes les autres : telle charge négative est annulée par une charge positive juste à côté. Mais quand on comprime ou qu'on étire un ensemble d'atomes groupés en unité asymétrique, ces derniers se déplacent de telle sorte que leurs charges ne s'annulent plus. Un côté se charge positivement et l'autre négativement. Multipliez l'effet de la compression et de l'étirement par les millions d'unités récurrentes dans tout le cristal, et vous obtenez une tension électrique mesurable. En reliant le cristal piézoélectrique à un circuit, on peut convertir cette tension en courant électrique. Ces matériaux pourraient être incorporés dans l'asphalte et produire de l'électricité

en se compressant au passage des véhicules. On pourrait stocker l'énergie pour dans des batteries et l'utiliser pour l'éclairage de la route. Plusieurs expériences pilotes ont déjà abouti à des résultats prometteurs. Cette technologie pourrait même être intégrée dans les pneumatiques des automobiles et les semelles des chaussures pour produire de l'électricité à partir du mouvement.

À l'avenir, les cyclistes, automobilistes et élus locaux seront soulagés de l'existence des nids-de-poule grâce au ciment autoréparant, un matériau intelligent qui détecte et répare spontanément ses propres défauts. Quand le ciment se craquelle, l'intérieur est exposé à l'humidité atmosphérique et à la pluie. Le ciment autoréparant comprend des ingrédients stimulés par l'eau pour remplir la fissure et un additif argileux contenant des bactéries dormantes et du lactate de calcium – un matériau bien connu de ceux qui ont abandonné un vieux morceau de fromage dans le frigo et l'ont retrouvé couvert de cristaux blancs. Activée par l'eau, la bactérie consomme le lactate de calcium et excrète du calcaire, lequel remplit la fissure et prévient de futurs dommages. Ce matériau pourrait être employé pour les routes, les bâtiments et d'autres infrastructures. Il serait particulièrement indiqué dans les régions sismiques.

Sous les climats froids, les cyclistes ont besoin de vêtements qui puissent s'adapter à la température du corps, respirables dans l'effort mais chauds à l'intérieur. La solution se trouve peut-être dans les polymères à mémoire de forme dont la forme change soudainement à la chaleur. Les polymères sont des matériaux qui présentent de longues chaînes de molécules, par exemple le caoutchouc, les plastiques et les matériaux naturels comme les

protéines. Le polymère se souvient de sa forme originelle à la fabrication. Le matériau est ensuite chauffé, adopte une forme temporaire, puis il est refroidi. Il conserve ce second état jusqu'à ce qu'il soit chauffé à la température de transition, recouvrant alors son aspect d'origine. Ces formes sont « mémorisées » par le matériau chaque fois qu'il est chauffé ou refroidi. Les futurs vêtements de cycliste pourraient être remplis d'un polymère douillet à mémoire de forme. Au froid, il piégerait l'air comme un sac de couchage, mais durant l'exercice se contracterait au contact de la chaleur corporelle et perdrait de son pouvoir isolant.

De même, les polymères sensibles à l'humidité changent de forme en présence d'eau. Au sec, le polymère est rigide. Mais l'eau agit comme un plastifiant et augmente la flexibilité du matériau. On peut utiliser ces polymères pour la fabrication de textiles couverts de minuscules écailles sensibles à l'humidité qui restent perpendiculaires aux fibres en condition sèche et permettent la respirabilité. Quand il pleut, les écailles se détendent à plat et se chevauchent pour former une couche étanche.

Nous connaissons tous les propriétés de guérison de notre peau après une blessure – une caractéristique bien utile en cas de chute à vélo. À l'avenir, nos vêtements feront la même chose grâce aux textiles autoréparant. Ces textiles contiennent un composant particulier – une protéine spéciale, synthétisable en laboratoire, qu'on trouve naturellement dans les « dents » qui entourent les ventouses des tentacules de calamar. Cette protéine permet au tissu de former de nouvelles liaisons chimiques de chaque côté d'une petite déchirure. L'autoréparation prend moins d'une minute et ne nécessite qu'un peu d'eau et de compression – un kit de

maintenance rapide, pour le moins. Si seulement nos ego pouvaient être aussi facilement guéris !

Une machine volante futuriste

Inspiré par le vol des oiseaux, Léonard de Vinci imaginait une machine volante humaine il y a plus de cinq cents ans – des siècles avant que quiconque n'ait même pensé à l'humble bicyclette. Sa conception prévoyait des ailes articulées flexibles en bois et en soie, qui pourraient battre comme celles d'un oiseau ou d'une chauve-souris. Nos avions ressemblent à l'invention de Léonard de Vinci avec leurs deux ailes. Mais ces dernières sont des structures rigides équipées de quelques parties mobiles. À l'avenir, les matériaux intelligents nous libéreront de la raideur des technologies actuelles. Ils nous ramèneront à la table à dessin de Leonardo où nous concevrons des avions aux qualités musculaires, flexibles, adaptatives et sensibles.

En vol, un avion doit endurer des forces variées, contre lesquelles la forme rigide et traditionnelle n'est pas toujours idéale. Les ailes du futur pourraient se dilater ou se contracter pour optimiser la portance. Elles se replieraient, s'étendraient, se déformeraient ou se rapprocheraient du fuselage en fonction de l'étape du vol. Ces adaptations en temps réel réduiront la traînée et accroîtront la manœuvrabilité. Elles raccourciront la distance de décollage et optimiseront l'aérodynamique selon les conditions de vol. Cela améliorerait le confort des passagers, réduirait le temps de trajet et la consommation de carburant.

Pour réaliser un tel avion, il nous faudra combiner tous les types de matériaux intelligents. Chargés du mouvement physique des ailes, les actuateurs seront fabriqués dans un alliage à mémoire de forme comme le Nitinol – un mélange de nickel et de titane – qui alterne entre deux états selon s'il est chauffé ou refroidi. Des matériaux légers à géométrie variable joueront aussi un rôle prépondérant, comme les polymères électroactifs, qui se dilatent ou se contractent sous une tension électrique. Les polymères à mémoire de forme seront également importants pour former l'enveloppe extérieure de l'aéronef. D'un état résistant et rigide à même de résister aux forces aérodynamiques, ils peuvent rapidement passer à un état d'extrême souplesse et élasticité, et permettre ainsi aux ailes de changer de géométrie.

Beaucoup de ces matériaux intelligents auront une double fonction. Ils opéreront aussi en tant que capteurs. Les polymères piézoélectriques et électroactifs engendrent des signaux électriques mesurables en réponse à un stress physique. L'indice de réfraction des fibres optiques change avec la température ou sous l'effet d'une force appliquée. En les incorporant dans la structure de l'avion, non seulement on obtiendra un matériau composite résistant, rigide et léger, mais on pourra détecter des dommages, des fissures ou un stress dynamique durant le vol. Ces matériaux composites peuvent être employés n'importe où, dans les bâtiments construits en béton intelligent qui alertent les ingénieurs sur les points de faiblesse potentiels, ou dans l'électronique souple.

Nos machines volantes futuristes pourraient même être sensibles au toucher du doigt grâce à des composites qui mettent en œuvre l'effet tunnel quantique. Il s'agit de matériaux intelligents qui

voient leurs propriétés passer d'isolantes à conductrices lorsqu'ils sont compressés. Ils comportent une matrice souple et caoutchouteuse contenant de petites particules de nickel. La substance de la matrice elle-même est un isolant électrique. À l'état de repos, les particules conductrices de nickel sont trop éloignées les unes des autres pour que le composite conduise l'électricité. Quand la matrice est activée par simple pression, les particules de nickel se rapprochent et les électrons peuvent franchir la matière isolante : le matériau devient conducteur. En mécanique quantique, on décrit l'emplacement des électrons à un endroit particulier en termes de probabilité plutôt qu'en coordonnées précises. Quand un électron d'une particule de nickel approche la barrière de l'isolant, il existe une probabilité très petite, mais non nulle, qu'il passe de l'autre côté au lieu de rebondir. Quand suffisamment d'électrons tentent de passer et que la probabilité est non nulle, la mécanique quantique enseigne que quelques chanceux se retrouveront de l'autre côté. Pour le moins exotiques, ces matériaux intelligents ont déjà été utilisés par des robots de la NASA pour sentir avec quelle force ils saisissent un objet. Ils pourraient également servir à produire une nouvelle génération d'écrans tactiles ou des prothèses qui redonnent aux amputés le sens du toucher.

L'héritage des matériaux intelligents

Tous les matériaux intelligents décrits dans ce chapitre ont fait leurs preuves en laboratoire. Il nous faut cependant surmonter de nombreux problèmes avant que nous puissions en profiter au quotidien. Dans beaucoup de cas, les temps de réponse sont trop

lents, les matériaux instables ou trop délicats. Leur performance peut s'amenuiser avec le temps et il s'avère parfois complexe de les incorporer dans des dispositifs fonctionnels. On éprouve souvent des difficultés à maîtriser leur seuil de déclenchement. Certains sont toxiques. Comme souvent avec les nouvelles technologies, les obstacles à leur large diffusion sont les coûts prohibitifs, la difficulté du passage à la production industrielle ou la rareté des matières premières.

Malgré tout, je reste optimiste. Je pense qu'un effort soutenu dans la recherche permettra de résoudre beaucoup de ces problèmes. De la même manière qu'internet a transformé notre rapport à l'information, les matériaux intelligents promettent de bouleverser la façon dont nous interagissons avec le monde matériel. Par définition, un objet est une chose passive, dénuée de pensée. Considérés isolément, même les matériaux intelligents sont trivialement monotâche : ils se contentent d'aller et de venir entre deux états selon des stimuli on/off. Mais combinez-les pour construire un avion à même de générer et de stocker de l'énergie, de se percevoir lui-même ainsi que son environnement, de s'assembler et se réparer tout seul, de s'adapter aux conditions extérieures et de communiquer avec ses homologues : tout à coup les objets semblent se rapprocher du vivant.

Les matériaux intelligents nous invitent à considérer quelques grandes questions. Sont-ils nécessairement pour le mieux ? Est-ce juste de complexifier de simples objets dans le but de nous faciliter la vie, si leur production, leur utilisation et leur recyclage consomment une précieuse énergie issue de rares ressources ? Même s'ils permettent d'utiliser moins d'énergie et de ressources, ils

vont créer leurs propres problèmes : la durée de vie accrue des matériaux intelligents autoréparant présentera un immense défi à l'industrie manufacturière et au commerce. Comment nos économies vont-elles d'adapter ? Les technologies intelligentes ne seront-elles disponibles que pour une élite de nantis ? Si nous commençons à confier l'automatisation de nos vies aux matériaux intelligents, ne risque-t-on pas une forme de dépendance, voire la perte de notre faculté à penser de manière critique et indépendante ? Dans nos artefacts, les matériaux racontent l'histoire de l'humanité. Un jour, rien d'autre ne restera de notre époque que quelques pièces de musée faites de ces matériaux aujourd'hui à la pointe de la technologie. Que raconteront-elles sur nous ?

Pour notre vie à tous, partout dans le monde, les bienfaits des matériaux intelligents surpassent largement les inconvénients et problèmes potentiels. Par exemple, les matériaux nécessaires pour construire l'avion du futur sont les mêmes que ceux avec lesquels nous fabriquerons des prothèses autoréparantes, contrôlées par le cerveau des amputés et qui restituent des sensations. Si les textiles adaptatifs et les infrastructures autoréparantes peuvent soulager les habitants des régions les plus affectées par les effets toujours plus imprévisibles du climat, alors cela en vaut la peine. Nous entretenons avec les matériaux une relation personnelle. Quand nous aurons disparu, j'espère que les matériaux intelligents témoigneront d'une espèce humaine sensible, adaptable, et résiliente aux défis et aux changements de l'environnement que refléteront les matériaux eux-mêmes.

13 Énergie

Jeff Hardy

Je dois vous faire un aveu : je suis un geek de l'énergie. Je suis passionné par l'énergie, qu'elle soit issue de la science la plus pointue, comme l'extraction de l'énergie de nos propres mouvements, ou de la plus banale technologie, comme l'humble chaudière à gaz. Cela fait de moi un original. Pour beaucoup d'entre nous, la relation à l'énergie est plutôt indirecte : nous la traitons comme un service de base, quelque chose qui devrait toujours être disponible sur simple pression d'un bouton. Ce n'est pas le cas dans les pays en développement, où deux milliards de personnes aspirent à un meilleur accès à l'énergie. À l'avenir, notre relation à l'énergie va évoluer. La demande en énergie entre en conflit avec les conséquences du changement climatique et d'autres contraintes. S'il est une chose assurée, c'est que l'énergie – et en particulier la recherche d'une source illimitée d'énergie propre – sera l'une des questions les plus importantes auxquelles se confrontera l'humanité. Mais plutôt que de craindre l'incertitude, nous devrions au contraire l'embrasser : dans ce chapitre j'explique pourquoi l'énergie devrait susciter notre enthousiasme à tous.

Énergie et gaz à effet de serre

Vous aurez lu le chapitre de Julia Slingo sur le changement climatique (chap. 3) et donc vous savez à quel point il est vital que

nous réduisons les émissions globales de gaz à effet de serre (GES). D'après l'Agence internationale de l'énergie, la production et l'utilisation de l'énergie représentent les deux tiers des émissions mondiales de ces gaz. Elles doivent aussi être une partie prépondérante de la solution étant donné l'importance de leur contribution au problème.

Comment décarboner l'énergie ? La réponse est d'une simplicité désarmante : en arrêtant de brûler des combustibles fossiles. Bien sûr, c'est bien plus difficile en pratique tant ils sont synonymes de modernité. Ils sont littéralement le carburant de nos existences. Il ne serait ni juste ni populaire d'exiger que les gens mettent leur vie quotidienne entre parenthèses le temps que nous trouvions une alternative. Il serait aussi injuste d'arrêter le développement dans des pays où l'accès à l'énergie est limité, même là où ce développement repose sur les combustibles fossiles. C'est pourquoi nous avons besoin d'un plan d'action pour réduire notre dépendance à ces combustibles de manière ordonnée.

Tout d'abord, nous devons obtenir un meilleur *rendement*, c'est-à-dire devenir plus efficaces dans notre utilisation de l'énergie. La façon la plus abordable de réduire les GES est de ne pas brûler les combustibles fossiles. Au Royaume-Uni et ailleurs, nous gaspillons beaucoup d'énergie. Par exemple, les deux tiers de l'énergie nécessaire pour fournir de l'électricité s'envolent durant la production et le transport dans les réseaux. De même, nous perdons de la chaleur à cause de nos bâtiments mal isolés. S'il est si facile et si avantageux d'économiser l'énergie, pourquoi ne le faisons-nous pas mieux ? Un élément de réponse réside dans le fait que les gens ne sont pas intéressés par les questions de rendement. Les incitations

(aides, subventions et autres) ne fonctionnent pas pour la majorité d'entre nous. Il existe un second problème : avec un meilleur rendement, les gens économisent de l'argent qu'ils tendent à dépenser pour des objets ou des services qui utilisent de l'énergie et génèrent à leur tour des GES – un véritable effet rebond. Par exemple, cela vous permet de chauffer davantage votre maison et de brûler plus de gaz ; ou vous pouvez dépenser ces économies dans de charmantes vacances, qui bien sûr impliquent un vol en avion.

Une deuxième solution serait d'être plus *intelligent* dans la façon dont nous gérons nos systèmes énergétiques. La plupart de ces systèmes reposent sur ce principe : la production d'énergie suit la demande. C'est particulièrement vrai pour l'électricité où l'on doit constamment veiller à l'équilibre de l'offre et de la demande. Les systèmes électriques peuvent être classés hiérarchiquement selon leur technologie : ceux qui tournent tout le temps formant les *charges de base* (comme les centrales nucléaires ou au charbon), les variables (comme le solaire ou l'éolien), les flexibles (comme les centrales à gaz) et les soutiens (comme les générateurs diesel, qui peuvent être enclenchés à tout moment, mais sont coûteux). Quand vous avez besoin de linge propre, vous lancez la machine à laver. Pour satisfaire cette demande, quelqu'un dans le système énergétique met en route ou augmente la production d'une centrale. Si votre lessive a lieu en une période de forte demande – par exemple quand tout le monde lave son linge – alors il y a des chances que l'unité de production fonctionne aux combustibles fossiles (centrale à gaz ou générateur diesel). Un système énergétique intelligent est un système où la demande suit les stocks

disponibles. Pour reprendre notre exemple ci-dessus, notre machine à laver pourrait nous demander « Pour quand voulez-vous vos vêtements propres ? » Elle démarrerait quand l'offre d'énergie serait suffisante (pourvu qu'elle respecte votre échéance) et ne nécessiterait pas l'enclenchement d'une unité de production additionnelle.

La troisième solution est de *remplacer les combustibles fossiles* par d'autres technologies ou par des combustibles produisant moins ou pas du tout de GES.

Pour l'électricité, on peut substituer le pétrole, le charbon et le gaz par des alternatives à faible bilan carbone comme les énergies renouvelables, l'eau, le vent, le solaire, la biomasse (brûler des arbres ou d'autres choses qui poussent), et l'énergie nucléaire.

La technologie de séquestration du carbone fournit une alternative. Cela implique d'adjoindre à la centrale électrique une unité de traitement chimique qui capture la plus grande partie des rejets de dioxyde de carbone. Le CO₂ est ensuite transporté par pipeline et injecté dans d'anciens champs pétrolifères ou gaziers, où il restera piégé pour toujours (en théorie). Si, au lieu de brûler des combustibles fossiles, vous brûlez de la biomasse et capturez le dioxyde de carbone, vous pourriez même avoir un bilan d'émission de CO₂ négatif ! En effet, un arbre absorbe du CO₂ atmosphérique lors de sa croissance. Donc, si vous le brûlez et séquestrez son dioxyde de carbone, vous en réduisez la quantité dans l'atmosphère (pour autant que vous remplaciez ces arbres). Cependant, toutes les biomasses ne présentent pas un bilan carbone neutre. Cela dépend de la façon dont elles ont poussé et ont été récoltées, remplacées et transportées, ainsi que du type de terrain utilisé.

Pour la chaleur, il existe plusieurs options. Pour notre chauffage, nous brûlons aujourd'hui beaucoup de gaz naturel (du méthane). Nous pourrions remplacer ce gaz naturel par un autre, qui contribuerait moins au réchauffement global – non pas par la chaleur émise, mais par l'effet de serre du CO₂. Par exemple, nous pourrions produire du biogaz à partir de la biomasse, ce qui conduirait à de moindres émissions nettes – avec les précautions discutées plus haut. Une autre option est d'utiliser de l'hydrogène. Quand on brûle de l'hydrogène, le sous-produit est l'eau. C'est donc très propre. Le problème, c'est que l'hydrogène est généralement produit à partir de gaz naturel et d'eau, suivant un procédé appelé vapoformage qui produit du dioxyde de carbone. Nous pourrions plutôt produire de l'hydrogène en séparant l'oxygène et l'hydrogène de l'eau à l'aide d'un courant électrique. Mais le procédé reste assez cher : il nécessite des catalyseurs comme le platine et du palladium, et l'électricité aussi a un coût.

Pour les transports, le combustible fossile est roi (pour l'instant, mais à l'avenir nous devrions utiliser l'hydrogène). Mais nous voyons de plus en plus de véhicules électriques et hybrides sur les routes. Ils sont de plus en plus populaires : à présent il y en a plus d'un million dans le monde. Nos attentes constituent le vrai défi. Nous voudrions qu'une voiture soit capable de rouler plusieurs centaines de kilomètres sur une seule charge et refaire le plein en quelques minutes. Les batteries et les bornes de recharges s'améliorent rapidement, mais il y a encore du chemin à faire.

Pour les questions de transport, il importe de prendre en compte les comportements – peut-être plus que pour l'électricité ou le chauffage. Aujourd'hui au Royaume-Uni, nous n'utilisons nos

voitures qu'environ 5% du temps. Dans un avenir relativement proche, notre rapport à cette question – comment aller d'un point A à un point B – pourrait changer avec les promesses du transport à la demande, comme les voitures sans chauffeur et les transports publics intelligents. Mais il faudra aussi compter avec de meilleurs aménagements cyclables des villes ou les technologies de réunion virtuelles.

L'éruption de la disruption

Une technologie disruptive remplace son prédécesseur et bouleverse le marché. Ou encore, il peut s'agir d'un produit entièrement nouveau qui crée une industrie entièrement nouvelle. Dans l'énergie, la disruption est déjà en cours.

Tout d'abord, nos dispositifs présentent de meilleurs rendements. En Europe, les labels énergétiques et les standards industriels ont permis d'économiser l'équivalent de la consommation énergétique annuelle de l'Italie. Par exemple, on remplace peu à peu la modeste ampoule à incandescence avec des diodes électroluminescentes (les LED) qui utilisent environ dix fois moins d'énergie. Les technologies intelligentes nous aident aussi à devenir plus efficaces avec des thermostats qui apprennent nos habitudes de consommation d'énergie, optimisent le chauffage de notre maison et nous permettent d'économiser (bien qu'il y ait toujours cet effet rebond, mentionné plus haut).

Les technologies énergétiques deviennent aussi plus abordables aux particuliers. Les panneaux solaires photovoltaïques sont de moins en moins chers à mesure que leur utilisation se

généralise. Ils ont une « courbe d'apprentissage » d'environ 21%. À chaque doublement cumulé des ventes ou des installations, le prix chute d'à peu près 21%. À présent, il existe plus ou moins 300 gigawatts de panneaux en fonction dans le monde. Il n'y a que dix ans, ce chiffre était plus proche de 10 gigawatts. (Pour donner un ordre de grandeur, si j'enclenche tous les appareils électriques dans ma maison j'aurai besoin d'une puissance d'environ 10 kilowatts. Comme un gigawatt représente un million de kilowatts, il suffit à 100 000 foyers en période de pointe). Cela génère aussi des millions de *prosumers* – des consommateurs qui produisent eux-mêmes leur électricité. La prochaine étape majeure devrait être le développement de batteries domestiques pour stocker cette électricité.

Des données partout

Il est de plus en plus clair que nous vivons dans un monde de *big data*. Tous nos dispositifs récoltent et transmettent des données : nos téléphones portables, les compteurs intelligents, les capteurs et le grandissant internet des objets. On utilise déjà les big data pour améliorer le marketing des produits, prédire les tremblements de terre ou rappeler aux patients oublieux de prendre leurs médicaments.

Combinées avec les techniques d'apprentissage machine (essentiellement des algorithmes qui peuvent apprendre et prédire à partir de données), les données (qu'il s'agisse ou non de *big data*) ont des retombées dans le domaine de l'énergie. On a pu démontrer qu'elles permettent de réduire la demande en optimisant des

processus comme la réfrigération dans les supermarchés ou le refroidissement des centres de données. Mais le potentiel est bien plus important. Elles pourraient jouer un rôle clé pour une utilisation plus intelligente de l'énergie en jouant sur l'offre et la demande, constamment et en temps réel.

Le puzzle de la disruption est complété par une dernière pièce. Il s'agit de l'émergence de nouvelles façons sécurisées de traiter les transactions *peer-to-peer* (de personne à personne). À la base de la devise virtuelle Bitcoin, la technologie *blockchain* (chaîne de blocs) consiste en un grand livre comptable, sécurisé et distribué qui enregistre les transactions entre parties. L'utilisation des *blockchains*, ou de technologies équivalentes, offre à deux parties ou plus la possibilité d'effectuer des transactions financières sans mandataire comme les banques. Dans le domaine de l'énergie, c'est important. Cela pourrait permettre des transactions d'énergie sécurisées en *peer-to-peer*. Par exemple, je pourrais vendre l'énergie de mes panneaux photovoltaïques directement à mon voisin, sans intermédiaire.

Les générations connectées

Ce n'est pas seulement la technologie qui change. Nous aussi, nous changeons. Nos rapports à l'énergie pourraient bien évoluer en s'accordant à nos futurs valeurs, attitudes et comportements. Nous constatons déjà des différences entre générations.

La génération Y, dite « du millénaire », est composée de personnes nées entre la fin des années 1970 et les années 1990. D'orientation progressiste, elle est connectée et maîtrise les usages

de la technologie. Les enquêtes révèlent que les millénaires vivent leur vie à travers la technologie mobile, et qu'ils sont davantage intéressés que les générations précédentes par l'énergie distribuée comme le photovoltaïque. En tant que tels, ils devraient adopter les technologies disruptives qui s'annoncent dans le domaine de l'énergie.

La génération Z est celle des personnes nées durant l'âge du Web. Elle a émergé, smartphone en main, dans un monde de médias sociaux et de technologies mobiles. Ces personnes ont globalement grandi en temps de crise, notamment financière, ainsi que dans une apparente aggravation des menaces sécuritaires. Les enquêtes les dépeignent comme pragmatiques, industrieuses et responsables sur les plans social et environnemental. Elles s'adaptent à l'innovation et aux disruptions, et elles exigent du monde des réponses et des services immédiats.

Les facteurs du changement sont importants. Ils nous disent quelque chose sur la façon dont pourrait évoluer notre rapport à l'énergie. Nous avons déjà exploré quelques-unes des tendances qui pourraient rendre plus personnelle notre relation à l'énergie. Insufflons un peu de vie dans ce tableau, avec trois illustrations des futures réalités possibles pour les générations Y et Z.

Une vie intelligente

Considérez le scénario suivant. Votre temps est précieux, si précieux même que vous avez délégué la responsabilité de gérer votre foyer à une entreprise nommée « Life-back ». Moyennant le règlement d'une facture mensuelle, l'entreprise s'assure que vous êtes au

chaud, nourri, distrait, mobile et productif. Votre maison est intelligente : vous pouvez lui parler et elle peut vous répondre. C'est pratique pour faire ses courses en ligne, par exemple. Votre maison est remplie d'écrans et de capteurs qui optimisent constamment votre espace de vie. Elle est bien isolée, elle est équipée de panneaux solaires sur le toit et d'une batterie électrique dans un placard. Quand il vous faut un peu de chauffage, une petite pompe à chaleur s'enclenche. Vous n'avez rien payé pour tout cela. L'entreprise vous fournit le tout, et vous la remboursez sur la durée avec l'argent que vous économisez sur la facture énergétique. Vous ne possédez pas de voiture. Votre maison intelligente sait généralement quand vous avez besoin de vous déplacer, et elle s'assure qu'un moyen de transport optimal est disponible. Parfois, c'est un véhicule électrique qui arrive devant chez vous. Ou alors elle vous rappelle quand le prochain bus s'approche de chez vous, ou vous invite à enfiler votre tenue de cycliste. En signant un contrat avec l'entreprise, vous avez accepté qu'elle puisse prendre des décisions à votre place. Par exemple, elle peut changer de fournisseur pour acheter le peu d'électricité dont vous avez encore besoin ; elle peut gérer votre demande domestique pour soulager les réseaux électriques quand ils sont sous pression. Vous êtes un participant actif sur le marché de l'énergie, même si quelqu'un d'autre s'en occupe pour vous.

Vous êtes maintenant un trader en énergie. Bienvenue dans le monde de l'énergie en *peer-to-peer* ! L'ancien modèle où vous l'achetiez auprès d'un fournisseur appartient au passé. Aujourd'hui, vous vous êtes débarrassé des intermédiaires et vous traitez directement avec les autres producteurs et consommateurs.

Comment cela fonctionne-t-il ? Votre maison est elle-même une centrale électrique. Vous avez des panneaux solaires sur le toit, et peut-être même une éolienne dans votre jardin et une batterie pour stocker l'électricité. Votre voiture, si vous en avez besoin, est presque certainement électrique. Le marché en *peer-to-peer* vous permet d'acheter et vendre toutes sortes de choses en l'occurrence de l'électricité. Les transactions sont enregistrées et payées à l'aide de grands livres comptables sécurisés et publics, basés sur les *blockchains* ou sur une technologie comparable. Ainsi vous pouvez acheter et vendre de votre électricité en toute sécurité. Vous êtes libre de décider avec qui et comment vous faites vos affaires. Peut-être cherchez-vous à maximiser votre profit en vendant de l'énergie quand les prix sont au plus haut et en l'achetant quand ils sont bas. Ou alors vous souhaitez optimiser votre consommation d'énergie verte. Vous pouvez vous en charger vous-même ou confier la mise en œuvre de votre stratégie à une tierce partie. Il convient d'isoler votre maison et d'installer des dispositifs intelligents qui en contrôlent la demande d'énergie. Combinés aux batteries, cela vous permet de varier les besoins en énergie de votre foyer et d'optimiser votre stratégie de trader. Cela vous permet aussi de gérer les priorités – par exemple de déterminer quand charger la batterie de la voiture ou chauffer la maison. Vous pouvez être aussi actif que vous le souhaitez sur le marché de l'énergie – les bénéfices seront en proportion de vos efforts.

Vous avez décidé de reprendre le contrôle de votre énergie de manière radicale en vous déconnectant du réseau. Pour être autosuffisant, vous avez dû considérer vos besoins en électricité, en chauffage et en déplacements. Vous avez minimisé votre demande

en optimisant la consommation énergétique de votre maison. Tous vos appareils domestiques s'alimentent en courant continu plutôt qu'alternatif, ce qui leur permet d'utiliser directement l'énergie de vos panneaux solaires. Pour les besoins additionnels en chauffage et en électricité, vous avez acquis un système de pile à combustible qui convertit les déchets domestiques (y compris les eaux usées) en électricité et en chaleur. Pour les télécommunications, la connectivité et les loisirs, vous avez l'internet mobile et des appareils connectés. Quand vous êtes hors de chez vous, vous accumulez de l'énergie à l'aide de petites cellules photovoltaïques intégrées à vos vêtements, ainsi qu'avec des collecteurs de mouvement dans vos chaussures. Ainsi vous chargez une batterie que vous transportez sur vous : vos appareils mobiles ne sont jamais à plat. Et si d'aventure vous vous trouvez à court d'électricité, vous avez appris à faire avec. Vous pouvez toujours demander à votre voisin s'il peut vous en prêter un peu...

Des individus pourraient s'organiser en communautés pour gérer certains aspects de leur énergie. En quelque sorte, ce sont des groupements d'intérêts ou de voisinage (ou les deux s'ils coïncident). Une communauté d'intérêts, ce serait quand les gens se réunissent pour négocier collectivement une meilleure offre de fourniture d'énergie ou peut-être financer un projet énergétique avec une levée de fonds commune. Des communautés de voisinages sont par définition locales, comme un village ou une ville où les résidents se concerteraient pour acheter et opérer des infrastructures énergétiques locales, comme des panneaux solaires, et dont ils partageraient l'énergie et les profits. Dans certains cas, les communautés pourraient avoir acheté l'ensemble du système

énergétique, y compris le réseau de distribution d'électricité et de chaleur.

Mais que faire si vous n'êtes pas relié au réseau électrique ? Aujourd'hui, c'est le cas d'une personne sur six dans le monde. Et si nous pouvions nous affranchir du besoin de construire un réseau électrique à l'échelle du pays, de la même manière que les téléphones mobiles ont évacué le besoin en lignes terrestres ? C'est déjà une réalité avec ce qu'on appelle les microréseaux (*microgrids*) : une combinaison de panneaux solaires (ou d'autres technologies de production d'électricité), de batteries, de systèmes de contrôle et de câbles pour connecter toute une communauté. En d'autres termes, c'est tout ce dont vous avez besoin pour fournir un service énergétique de base à une communauté hors réseau. Cela fournit de l'éclairage nocturne et permet à la communauté de recharger divers dispositifs, comme les téléphones portables. Ces services basiques présentent d'immenses avantages économiques et sociaux. Les améliorations et la réduction des coûts de la technologie solaire et des batteries pourraient rendre caduque la nécessité de développer des réseaux à l'échelle nationale. Si vous combinez les microréseaux électriques avec la téléphonie mobile et l'internet mobile, vous pouvez vous affranchir de trois réseaux dont la construction a pris des décennies dans d'autres pays. D'autres développements pourraient définitivement remplacer l'argent liquide. Avec les systèmes de paiement sans espèces par exemple, les citoyens peuvent acheter des biens simplement avec leur téléphone portable et un numéro d'identification personnel lié à des données biométriques, comme les empreintes digitales. Cela ouvre des possibilités à ces communautés nouvellement connectées, comme

de contracter des emprunts bancaires, de payer pour des biens et des services, créant par là même des opportunités de développement. Grâce à ces innovations, les pays dénués de réseau national n'en auront peut-être jamais besoin.

Penser global

Prenons de la distance avec les échelles individuelle ou communautaire, et considérons l'énergie en termes intercontinentaux, voire mondiaux. Bien sûr, l'énergie est déjà globale puisque nous faisons circuler d'immenses quantités de ressources d'un pays à l'autre. Mais pourrions-nous faire de même avec l'électricité ?

À de nombreux égards, c'est déjà le cas. Par exemple, la plupart des pays européens sont connectés. Même la Grande-Bretagne est reliée à la France, aux Pays-Bas et à l'Irlande (des câbles électriques sous-marins et des conduites de gaz naturel). Mais pourrions-nous le réaliser à plus grande échelle encore ?

Desertec est un projet de super-réseau dont l'avenir semble ensoleillé. L'idée est de produire de l'électricité dans des fermes solaires et éoliennes, ainsi que dans des centrales à concentration solaires réparties dans les environs du désert du Sahara. On enverrait le surplus d'électricité vers l'Europe grâce à un réseau de nouvelles lignes à haute tension en courant continu via l'Espagne et l'Italie. Les centrales à concentration solaire méritent une brève explication. Imaginez un champ de miroirs pointés vers un collecteur central sur une tour – un peu comme on focalise les rayons solaires avec une loupe. Dans ce cas, les rayons concentrés génèrent des

températures allant jusqu'à 1000 °C, ce qui permet d'alimenter une turbine à vapeur, exactement comme dans une centrale thermique traditionnelle. Dans les centrales à concentration solaire, la chaleur résiduelle peut être accumulée en fondant des sels dans des réservoirs géants. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour produire de l'électricité la nuit.

Les scientifiques ont aussi imaginé d'installer des panneaux solaires dans l'espace et de renvoyer leur énergie sur Terre avec des rayons laser. Cela ressemble un peu à un scénario à la James Bond, mais l'idée circule depuis au moins les années 70. Appelées « centrales solaires orbitales », elles reposent sur une logique solide. Environ 60% de l'énergie solaire est perdue pendant sa traversée de l'atmosphère terrestre. Donc, en plaçant les panneaux au-delà, on augmenterait considérablement l'énergie disponible. Une fois résolue la question de l'installation des panneaux dans l'espace, le défi suivant est de récupérer cette énergie sur Terre. Les micro-ondes et les rayons laser semblent les meilleurs candidats. Enfin, vous devez pointer ces rayonnements vers un récepteur au diamètre de plusieurs kilomètres. Cette sorte d'antenne réceptrice les recevra et les convertira en énergie électrique. En plus des préoccupations inhérentes au pointage d'un rayon à haute énergie vers la Terre, se posent également des questions politico-économiques de possession et de financement de l'énergie.

Un dernier pour la route...

Nous avons très rapidement couvert le sujet de l'énergie du futur. Dans le détail, toutes ces prédictions sont très certainement fausses,

mais j'espère que vous comprenez désormais en quoi notre relation à l'énergie va sans doute changer d'une manière ou d'une autre.

Je voudrais conclure avec l'expérience de pensée suivante.

Mettez un instant votre scepticisme de côté. Et si l'énergie était entièrement gratuite ? S'il n'y avait ni câbles ni tuyauterie ? Si nous pouvions récolter l'énergie dans l'air comme nous le faisons avec les données sans fil ? Cela semble extravagant mais cela pourrait être possible. De l'énergie gratuite (ou très bon marché) pourrait être disponible sous la forme d'énergie solaire à très bas prix (qui rayonnerait peut-être de l'espace) ou d'autres ressources renouvelables. Ou peut-être allons-nous enfin réussir à produire de l'énergie par fusion nucléaire (une technique qui vise à imiter le fonctionnement du Soleil dans des centrales terrestres). Les transmissions sans fil sont également beaucoup plus répandues que vous ne pourriez le penser. Les brosses à dents électriques et certains téléphones portables se rechargent par induction – peut-être pourrait-on utiliser cette technologie ou quelque chose de similaire. Pour transporter de l'énergie sur de grandes distances, nous pourrions toujours utiliser les rayons laser ou les micro-ondes, notamment depuis les centrales solaires orbitales. Mais mon propos ne porte pas tant sur la faisabilité technique ou économique, que sur la manière dont tout cela changerait notre relation à l'énergie. Si l'énergie était gratuite, comme l'air que nous respirons, comment cela modifierait-il le rapport que nous entretenons avec elle ?

14 Transports

John Miles

La question des transports semble un peu déplacée face à des sujets aussi imposants que l'intelligence artificielle, la démographie, l'ingénierie génétique ou le transhumanisme. Avec ses images prosaïques de bus, de trains et d'aéroports bondés, mérite-t-elle de figurer dans un livre qui pose des questions aussi importantes que l'avenir de l'humanité ? Il n'empêche que dans notre Histoire, les transports ont eu une influence profonde sur nos existences. Avec un peu d'imagination, nous pouvons saisir toutes les manières par lesquelles ils pourraient continuer à nous surprendre et à façonner nos futurs modes de vie.

On admet généralement que les besoins de base de l'être humain tiennent en une courte liste qui comprend la nourriture, l'eau, un abri, la protection contre les menaces de l'environnement et l'amour. Les transports n'y figurent pas. Malgré leur absence du répertoire classique des *besoins* humains, ils ont joué un rôle crucial de *catalyseur* à de nombreuses étapes critiques du développement de notre civilisation moderne. L'invention de la roue a conduit au chariot tiré par la force animale et de là, à toutes les formes de transports motorisés. C'est le plus simple et le meilleur des exemples. La construction des routes, des canaux et des chemins de fer ont également permis à la société des développements tels qu'ils auraient été inconcevables avant l'arrivée de ces concepts. Pour vous donner un aperçu des prochaines grandes étapes dans

les transports, il nous faut donc comprendre en quoi l'histoire de la route, du rail et du transport aérien a exercé une telle influence sur nos modes de vie.

Coût, temps, capacité et commodité

Les développements de nouveaux transports ont tous un visage différent. Certains sont spectaculaires (le Concorde, par exemple, ou les missions Apollo sur la Lune) et d'autres, rétrospectivement, sont très « ordinaires » (la péniche ou la Ford T). Ces exemples suggèrent que l'impact n'est pas relatif à la complexité ou à l'ingéniosité de la technologie, mais qu'il reflète des propriétés plus fondamentales.

Considérons trois attributs de base, qui caractérisent tous les systèmes de transport qui ont connu le succès. Le premier est l'abordabilité (ou le coût). À moins qu'il ne s'agisse de quelque chose d'absolument nécessaire, rien ne s'impose dans les fondements de la société qui n'est pas abordable. À cet égard, un coût accessible figure le prérequis le plus manifeste au succès de tout nouveau système de transport. Les deux autres attributs clés sont le temps de trajet (la vitesse) et le taux de transfert (la capacité).

L'acteur historique le plus important pour l'innovation des transports a sans doute été l'armée. Pour les militaires, le coût est sans conséquence pourvu que soient assurées la vitesse et la capacité. C'est pourquoi les Romains ont construit des routes qui permettaient à de nombreuses troupes et aux équipements de se déplacer rapidement d'un camp à un autre sans se préoccuper des

coûts. Ce faisant, l'Empire a créé des connexions entre les centres urbains qui serviraient ensuite de système vasculaire au développement économique – d'abord à l'échelle régionale, puis nationale et continentale. Une histoire similaire s'est déroulée dans le transport maritime. Dans les deux cas, la raison première était militaire, mais l'avantage ultérieur (et sans doute bien plus important) s'est avéré être la facilitation du mouvement des hommes et des marchandises. Au fil du temps, le commerce s'est intensifié sur des distances plus grandes, ce qui a permis un plus vaste développement économique – régional, national et international. Au final on peut constater un lien manifeste entre la mise en place de systèmes de transports terrestres et maritimes d'une part, et l'établissement de nations, d'empires et de zones d'échange d'autre part. Mais la transition n'est pas automatique, de la nécessité militaire à l'accélération du développement économique. Il suffit de regarder l'histoire des vols supersoniques pour constater que, dans certains cas, une exceptionnelle prouesse militaire peut s'avérer plus ou moins inutile à la suite du développement socio-économique. Le Concorde n'est pas devenu le moyen de transport universel qu'espéraient ses concepteurs. Pour quelles raisons ?

À mon avis, la réponse est que le Concorde n'offrait pas une combinaison viable des trois attributs des transports – le coût, le temps et la capacité. Le bénéfice en durée de trajet (vitesse) était extraordinairement élevé, mais cet avantage ne suffisait pas à justifier l'énorme coût par personne au kilomètre ni à contrebalancer le très faible taux de transfert (seulement 128 passagers par vol au maximum). Le vrai gagnant est le jumbo-jet, qui s'est imposé dans l'aviation : l'accroissement du nombre de sièges a simultanément

réduit le coût par passager au kilomètre et accru la capacité de l'ensemble du système malgré une moindre vitesse.

Dans le transport des personnes sur de grandes distances, l'avion s'est avéré plus efficace que pour les marchandises. La navigation assure beaucoup mieux le transport de fret international. Elle s'en sort très bien sur le critère du coût à l'unité (dans ce cas, le coût à la tonne par kilomètre) et de la capacité (tonnes par jour ou par année). Mais elle reste éminemment mauvaise en termes de temps de trajet. Avant l'avion il n'y avait pas d'autre choix pour les voyages intercontinentaux. C'est pourquoi les voyages maritimes ont connu un certain succès pour le transport de passagers. Mais le temps de trajet était si long que, sauf circonstances exceptionnelles, il s'agissait d'un aller simple. La navigation a permis l'émigration d'Europe vers les États-Unis, le Canada, l'Argentine, l'Afrique du Sud, l'Australie, etc., mais également dans l'autre sens, des anciennes colonies vers le vieux Continent. Les voyages maritimes ont eu un impact énorme sur notre société moderne. Ils appartiennent désormais au passé. Jamais le bateau n'aurait pu offrir ce que l'avion permet de nos jours : une liberté de mouvement universelle, dans les deux directions. Mais pour les denrées non périssables, le temps de trajet a peu d'importance. C'est pourquoi la voie maritime reste cruciale pour le transport de fret. L'introduction du conteneur et la construction de navires toujours plus grands ont entraîné un énorme accroissement des mouvements de biens entre les continents. C'est devenu l'un des piliers de la mondialisation.

Si le coût, le temps et la capacité ont été les trois critères à même d'évaluer les modes de transport historiques, ils ne seront peut-être plus pertinents à l'avenir. Par le passé, nous aurions pu

choisir le train pour commuter au travail parce qu'il est plus rapide que la voiture – nous avons également la possibilité de travailler un peu durant le trajet. Mais nous pourrions changer d'avis si à l'avenir il est possible de travailler depuis notre véhicule parce qu'il se conduit tout seul, et parce que nous sommes connectés à internet avec notre smartphone. En d'autres termes, l'apparition des communications mobiles, de l'informatique itinérante et des systèmes de conduite autonome pourrait orienter le choix du mode de transport en fonction de la *commodité*, plus que du *temps*. À mon sens, la façon dont la technologie pourrait changer notre vision des déplacements inaugure de grands changements dans l'histoire des transports, qui souligne une fois de plus la puissance cachée de la révolution numérique.

Quels sont donc les facteurs qui pourraient influencer les futures possibilités de transport, pour nous et pour nos enfants ?

L'impact environnemental

À l'heure actuelle, l'empreinte carbone moyenne dans le transport de passager au Royaume-Uni est d'environ 100 grammes de CO₂ par passager au kilomètre. Les politiques gouvernementales s'efforcent surtout de diminuer drastiquement ce chiffre. Dans beaucoup de pays, la législation actuelle impose de réduire en 2050 l'empreinte carbone nationale à 20% de ce qu'elle était en 1990. Étant donné que certaines formes de consommation d'énergie ne pourront sans doute jamais descendre à ce niveau (par exemple, le transport aérien), les transports routiers devront faire encore mieux. Pour ces

derniers, pourrions-nous en 2050 atteindre 10% des niveaux de 1990, voire des émissions nulles ?

La plupart des experts s'accordent sur le fait qu'à long terme, les jours du moteur à combustion sont comptés. Pour ceux qui ont de l'imagination, cela figure une nouvelle opportunité. Je pense à l'arrivée du constructeur automobile Tesla, une compagnie créée de toutes pièces dans la Silicon Valley en 2003 par une équipe d'entrepreneurs et d'ingénieurs, mus par une solide vision des transports personnels à la fois propres et séduisants. Après un départ laborieux, puis l'arrivée à sa tête de l'iconique Elon Musk, l'entreprise propose désormais une gamme attrayante de voitures électriques. Vendre 100 000 véhicules par an est à sa portée. À l'heure où j'écris ces lignes, la valorisation boursière de Tesla vient de dépasser celle de Ford – un événement inconcevable il y a peu. C'est une illustration frappante de la disruption à l'œuvre – des entreprises sans histoire dans l'industrie automobile qui refusent de jouer selon les règles établies. Cela n'aurait jamais pu avoir lieu à aucun autre moment des 70 années écoulées entre la consolidation des pionniers de l'industrie automobile et les temps présents. Même le prétendant le plus motivé n'aurait pas eu les poches assez profondes pour surmonter les obstacles initiaux. Mais les entreprises du genre *tech-companies* sont différentes. Elles sont capables de lever des fonds considérables auprès des investisseurs de la Silicon Valley. Aussi l'arrivée de Tesla apporte-t-elle la soudaine promesse d'une révolution. Les acteurs de la disruption auront un impact durable, qu'ils échouent ou qu'ils réussissent leur épreuve de force avec l'industrie automobile traditionnelle. Au cours des dernières années, presque tous les géants établis du secteur ont fait part de

leur intention de produire une gamme de véhicules entièrement électriques, et peu doutent qu'ils soient capables de tenir leur promesse avant longtemps.

À l'heure actuelle, la commodité et la capacité des véhicules électriques ne diffèrent pas tant de celles de leurs homologues conventionnels, dont le moteur à combustion carbure aux énergies fossiles. En termes de coût (pour le moment du moins), ils font moins bien. Tandis que les voitures électriques se substitueront probablement aux véhicules actuels suivant un renouvellement graduel, cela ne changera pas radicalement le paysage socio-économique. Mais il y a d'autres aspects de la disruption, sur lesquels je reviendrai plus tard, qui pourraient entraîner des effets beaucoup plus importants.

Transports publics et mobilité intelligente

La révolution numérique a favorisé une prise de conscience de la population quant au rôle des transports publics. Le concept de « mobilité intelligente » s'est imposé chez les professionnels du secteur. Cela veut dire qu'on remplace l'idée d'un trajet exclusivement en voiture, en bus ou en train par celle d'un voyageur qui se rendrait de A à B en combinant diverses offres disponibles de transports publics. Ce « déplacement multimodal » est depuis toujours le Graal des planificateurs. Mais par le passé, cette vision se heurtait à de frustrantes réalités : attendre une demi-heure sous la pluie à un arrêt de bus ou marcher un kilomètre jusqu'à la station de métro la plus proche. Il y a de quoi horrifier le voyageur lambda. Pour trop de banlieusards du monde entier, les transports publics

évoquent la forme la plus indigne du déplacement, quelque chose à éviter à moins que l'on n'ait pas d'autre option. Pour tous ceux qui en ont les moyens, la voiture est donc devenue le choix par défaut, même si cela implique des heures dans les bouchons, la difficile recherche d'une place de stationnement et d'autres inconvénients encore.

Dans le meilleur des mondes de la mobilité intelligente, les transports publics pourraient apparaître sous un jour nouveau. Dans une vision idéale, on passerait d'un transport à l'autre sans délais ni incertitude, grâce à des systèmes d'information connectés à des systèmes de transports publics flexibles qui réagissent à la demande et gèrent trains, bus et vélos. Les transports publics seraient alors en mesure de fournir une solution rapide et fiable de déplacement porte-à-porte. Ils nous épargneraient le stress de la conduite sur des voies congestionnées et la lutte pour une place de stationnement une fois destination.

Véhicules autonomes

Le développement de plus en plus rapide des véhicules autonomes est un autre domaine où la disruption menace l'ordre établi de l'industrie automobile. L'apparition de Google, Apple et Uber sur le devant de la scène crée beaucoup de tension. Encore une fois, la question n'est pas de savoir si ces entreprises parviendront effectivement à détrôner les acteurs traditionnels ; elles ont déjà imprimé un énorme changement dans la direction que prend l'industrie. Ne serait-ce que pour cela, elles marqueront l'avenir. Le gagnant de cette compétition – celui qui proposera le premier

véhicule totalement autonome – recevra des lauriers. Mais le plus important, c'est qu'elle ait démarré, et que désormais les acteurs traditionnels comme ceux de la disruption progressent tous deux de plus en plus vite.

Cette technologie a clairement le potentiel de changer la donne, et ce pour deux raisons. Dans beaucoup de métropoles développées ou en développement, de New York à Bombay, il existe un problème aigu de congestion du trafic. Les responsables politiques et les fonds publics subissent une pression croissante pour bâtir plus de routes et augmenter la capacité ferroviaire. La réalisation de nouvelles infrastructures est coûteuse et peu commode ; les délais de planification et de construction se mesurent en décennies. Or de simples calculs suggèrent que les véhicules autonomes pourraient améliorer drastiquement la situation. Ils respectent mieux les voies de circulation, permettent de diminuer la distance entre véhicules et entraînent moins d'accidents mineurs dus à l'inattention. Ces bénéfices compenseraient aisément le nombre accru de trajets que les systèmes autonomes partagés ne manqueraient pas d'engendrer. Réduire la congestion du trafic équivaut à fournir une plus grande capacité. Une augmentation significative de la capacité, à moindre coût et pour des nuisances quasi nulles : de tels avantages méritent que nous y travaillions sérieusement.

Il existe une seconde raison pour que les observateurs des transports prennent au sérieux les véhicules autonomes. C'est la promesse de « récupération du temps ». Ce terme jargonnesque réfère au fait qu'une fois installé dans son véhicule autonome, notre (ex-)conducteur sera libre de se consacrer à autre chose pendant son itinéraire. Cela peut être du travail de bureau, une activité

récréative ou simplement une petite sieste. Cette possibilité neutralise le côté déplaisant de la lenteur du trajet. Si vous pouvez faire quelque chose que vous considérez comme utile pendant votre déplacement, il n'y a plus de raison de s'énerver quand il prend plus de temps que prévu. C'est particulièrement le cas si des systèmes d'information vous préviennent des retards, et s'ils vous tiennent à jour à mesure que vous approchez votre destination.

Où donc pourraient apparaître les vraies stars de l'avenir ? Pour être honnête, je n'en sais rien. Mais il y a bien quelques très intéressants candidats à l'horizon et je peux me livrer à des suppositions d'expert.

Tout d'abord, la domination de la voiture va s'amenuiser (sans totalement disparaître) pour les trajets relativement courts dans un environnement urbain ou suburbain. Cette érosion de la suprématie automobile sera la conséquence de l'amélioration considérable des services de transports publics due aux solutions de mobilité intelligente qui commencent à voir le jour. La *commodité* de l'usage des systèmes de transports publics va augmenter de façon spectaculaire : la capacité va s'accroître en réponse à la demande, ce qui engendrera une dégringolade du coût du voyage par passager (comme on l'a constaté dans les transports aériens avec le jumbo-jet). Afin que ce scénario aboutisse, il faudra bien sûr que les transports publics fournissent un moyen plus attrayant que la voiture individuelle pour se déplacer de A à B. Attirer les passagers avec un meilleur service est bien plus efficace que de les menacer avec des pénalités s'ils ne renoncent pas à leur mode de transport favori (à l'heure actuelle, la voiture). Nous mettrons en place une offre de transports publics plus attrayante, en nous assurant de la fiabilité et

de la fluidité des trajets multimodaux. Les quelques inconvénients dus aux changements de mode de transport seront compensés par les avantages : éviter le stress de la conduite, par exemple les embouteillages ou la recherche d'une place de stationnement.

Pour les distances intermédiaires (de 5 à 300 km), la domination de la voiture se renforcera plus qu'elle ne s'amoindra. Ce sera la conséquence de l'arrivée sur le marché des véhicules autonomes. Cela signifie que nous bénéficierons de capacités de transport considérablement accrues, et que nous verrons une réduction radicale du nombre d'accidents de la route, le tout sans peser outre mesure sur les budgets publics. Plutôt que transformer notre environnement socio-économique cela va soulager nos difficultés actuelles, mais ne sera pas moins une évolution importante.

Ma troisième prédiction concerne la très populaire idée de transports terrestres proches de la vitesse du son (le projet « Hyperloop »). La presse s'est largement fait écho de cette idée depuis sa proposition originelle par Elon Musk en 2013. Il s'agit, pour ainsi dire, d'une sorte d'avion électrique dans un tube. Imaginez quels effets pourrait avoir une connexion rapide et régulière entre villes distantes si la durée du trajet et la fréquence étaient comparables à celles d'un métro urbain moderne. Au Royaume-Uni, un voyage de Londres à Manchester prendrait le même temps que pour aller de Waterloo à Edgware par la ligne Nord du métro londonien ; de même, Musk évoquait un San Francisco – Los Angeles en 45 minutes. À l'échelle nationale, cela aurait un effet économique identique à celui qu'ont entraîné les métros de Londres ou de Paris à l'échelle de ces villes – c'est-à-dire que l'ensemble de la région desservie commencerait à fonctionner comme une entité

économique unique et homogène. Par exemple, cela pourrait combler le fossé nord-sud en Grande-Bretagne et répartir les bénéfices obtenus dans l'entier du pays. Les mêmes arguments sont valables dans d'autres nations de taille petite à moyenne. Mais comme pour le Concorde, cela ne pourra fonctionner qu'à condition d'offrir des déplacements bon marché ainsi qu'un taux élevé de transfert de passagers, en même temps qu'une très courte durée de trajet. Sinon cela se limiterait à une solution de niche pour voyageurs aisés – un modèle qui aurait peu de chances de changer l'ordre socio-économique.

Au-delà de ces réflexions, je ne vois rien à l'horizon, en matière de transports qui puisse modifier profondément nos modes de vie. Sans doute verra-t-on arriver des véhicules routiers à faibles niveaux d'émission (ou même à zéro émission), mais ils ne changeront pas en eux-mêmes notre manière de vivre. Il y aura des développements dans les technologies navales. Mais si les coûts et les capacités devaient continuer à s'améliorer, le handicap fondamental pour le transport de personnes – le temps de trajet – a peu de chance d'être jugulé. Aussi les avions éclipsent-ils toujours cette forme de transport – tant que nous les utiliserons. Et l'argument opposé s'applique au transport aérien. Nous continuerons à améliorer les avions conventionnels par incréments successifs, mais en l'absence d'un changement radical des capacités ou du temps de vol (sans augmentation du coût du trajet par passager), on ne doit pas s'attendre à des évolutions durables. Quant au fret aérien, les évolutions dépendraient d'avions-cargos à même de concurrencer la capacité des très grands porte-conteneurs – une perspective très improbable.

La prochaine frontière, bien sûr, c'est l'espace (voir [chap. 16](#)). Maintenant que vous êtes familiarisés avec la problématique coût/commodité/capacité, je vous laisse analyser par vous-même comment combiner ces paramètres pour que, quelle que soit la réponse, ils aient un impact durable sur nos modes de vie...

15 Robotique

Noel Sharkey

Nos relations avec les robots ouvrent de nombreux avenir possibles. Certains sont au bénéfice de l'humanité, tandis que d'autres mènent tout droit à la dystopie. On ne peut dire lequel de ces futurs s'imposera. C'est un domaine où abondent les observations à la boule de cristal et les poncifs de la science-fiction. Mais au-delà de ces égarements, et alors que les gouvernements lorgnent avec avidité les potentiels milliards d'euros qui stimuleraient leurs économies, nous devons maintenant poser quelques questions pressantes, avant que cette boîte de Pandore ne s'ouvre aux entreprises.

Il y a déjà quelques décennies que nous flânon au tournant de la révolution robotique. Depuis les années 50, les robots travaillent dans nos usines, peignent des automobiles, assemblent des composants et exécutent de nombreuses tâches ennuyeuses et répétitives, plus rapidement que les êtres humains. Mais aujourd'hui, les nouveaux « robots de service » les surpassent largement en nombre. Ce sont des robots actifs en dehors de l'usine. Ils remplissent une multitude de tâches, des soins médicaux à la garde des enfants ou des personnes âgées ; de la cuisine et la préparation de la nourriture à la réalisation et au service de cocktails ; des corvées ménagères à l'agriculture et à l'élevage ; du maintien de l'ordre (ils se chargent des exécutions dans les conflits armés) à la surveillance et la réparation des dommages du changement

climatique ; des interventions chirurgicales à la vie intime robotisée et à la protection des espèces en danger.

L'industrie traverse une époque captivante. Appâtés par de nouveaux et énormes marchés globaux, les gouvernements et les grandes entreprises tendent à considérer la robotique comme un puissant catalyseur économique, et les financements commencent à suivre pour la recherche et le développement. De nombreuses entreprises et start-up créent une foule de nouvelles applications basées sur la robotique, dans ce qui est en train de devenir un marché hautement concurrentiel, qui stimulera l'innovation.

Ce qui surviendra dépendra pour une grande part des réglementations internationales, mais aussi des responsabilités sociales qu'endosseront les ingénieurs et les entreprises qui conçoivent et produisent les robots. Pour progresser, de nombreux développements ont besoin de la confiance des consommateurs. Sans elle, les avancées seront beaucoup plus lentes et les investisseurs perdront leur mise.

La technologie de la conduite autonome

Par une chaude journée de 2005, dans le désert de Mojave dans le Nevada, une Volkswagen Touareg sans conducteur inscrivait son nom dans les livres d'histoire et remportait un prix de 2 millions de dollars. C'était le premier concurrent à franchir la ligne d'arrivée du DARPA Grand Challenge : une course de 212,5 km à travers le désert que le véhicule, baptisé Stanley, a couvert en 6 heures, 53 minutes et 8 secondes. Cinq autres voitures ont franchi la ligne à quelques minutes d'intervalle.

C'était une avancée extraordinaire dans le domaine de la robotique. Une année auparavant, durant l'édition précédente du Darpa Grand Challenge, la plus longue distance couverte par l'un des quinze concurrents n'était que de 11,5 km – soit 201 km avant l'arrivée. Google a immédiatement mis la main sur l'équipe gagnante pour lancer le célèbre projet de voiture autonome *Google Self-Driving Car Project (SDC)*.

Aujourd'hui, de nombreuses entreprises s'apprêtent à entrer en concurrence sur le nouveau marché des transports. Il existe déjà des camions autonomes qui assurent des livraisons quotidiennes depuis des mines en Australie du Nord. Il y a des tracteurs sans conducteur pour optimiser l'exploitation agricole, et des bus autonomes sont en cours de test aux États-Unis, au Danemark et au Japon. Aux USA, Uber a complété sa flotte de taxis avec des voitures autonomes. Bien sûr, dans un avenir proche, tous ces véhicules autonomes accueilleront encore un opérateur humain pour intervenir si nécessaire.

L'un des grands moteurs du développement des véhicules autonomes, c'est la croyance en une réduction drastique du nombre de morts sur les routes. L'argument repose sur l'utilisation de capteurs pour détecter les autres véhicules et les piétons, bien plus fiables et rapides qu'un conducteur humain. Ils permettent de mieux manœuvrer pour éviter les impacts. De plus, un robot chauffeur ne s'assoupit pas, n'est jamais soûl et ne se laisse pas distraire par les hurlements d'un enfant sur la banquette arrière.

Mais tout le monde n'est pas convaincu. Après que le Nevada eut modifié sa législation pour l'adapter aux voitures autonomes, Chuck Allen, de la patrouille autoroutière de cet État, déclarait :

« Quand vous prenez en compte la sécurité d'autrui en laissant un dispositif mécanique vous dicter votre vitesse et votre trajectoire, cela devient assez préoccupant ». Bien qu'il n'y ait eu que de rares accidents impliquant des véhicules autonomes, on a pu témoigner de sérieux revers et de quelques collisions mortelles. Les conducteurs humains doivent rester vigilants et attentifs. Ils doivent pouvoir reprendre le contrôle dans une situation imprévue, par exemple des panneaux de signalisation temporaires, des dangers que seule une personne est à même d'évaluer correctement ou encore un gendarme qui signale un ralentissement à cause d'un incident plus loin. Mais le fait de passer des heures à ne rien faire d'autre que d'observer peut induire un biais d'automatisation. Le conducteur en arrive à se confier entièrement au véhicule, au point de n'être pas prêt à réagir quand surviennent les dangers.

Ensuite, il y a des questions éthiques. Quel doit être le choix d'une voiture sans conducteur dans certaines situations ? Doit-elle rentrer dans le vieux monsieur à bicyclette plutôt que dans la femme enceinte avec deux enfants dans le véhicule en face, ou encore les éviter tous les deux en obliquant dans un mur, tuant son propre occupant ? Bien que ces questions soient intéressantes, elles restent très éloignées des actuelles capacités de détection des voitures autonomes. En plus que de disposer de capteurs précis, le véhicule devrait aussi « connaître » le revêtement de la chaussée et si elle est couverte de quelque chose. Elle devrait réaliser l'impossible, en détectant ce qui est caché à ses détecteurs.

Il nous faudra encore quelques années pour aplanir ces difficultés. Mais nous pouvons nous attendre à ce que nos voies de circulation rapides changent du tout au tout d'ici à 2050. Nous

pourrions réduire considérablement les accidents si nous retirions l'humain de l'équation, et si les voitures autonomes communiquaient entre elles et avec des capteurs dans la chaussée, s'alertaient les unes les autres en cas d'incident et s'adaptait automatiquement aux conditions. Bien sûr, un aspect négatif reste la vulnérabilité du système aux hackers.

La domestication des robots

Nous sommes déjà nombreux à posséder des robots, même s'ils illustrent le côté ennuyeux de la technologie. Les robots domestiques ne sont pas les serveurs humanoïdes de la science-fiction. Ils ne sont pas à l'image de C-3PO. Certains ressemblent à des frisbees sur roulette et sont chargés de tâches que nous sommes peu à apprécier, comme passer l'aspirateur et la serpillière, dégager les gouttières ou déboucher les canalisations.

Selon la Fédération internationale de robotique, on a vendu 4,7 millions de robots à usage personnel et domestique en 2014. En 2015, le chiffre est monté à 5,4 millions pour une valeur totale de 2,2 milliards de dollars. Et ce grand marché global ne devrait pas baisser avant longtemps : l'IFR prévoit que 42 millions d'appareils seront vendus sur la période 2016-2019 (dans la fourchette basse des estimations).

Dans le foyer du futur, les robots effectueront de plus en plus de nos tâches domestiques de nettoyage. Il y a aussi de nouveaux développements, par exemple les robots qui repassent et plient les vêtements, et d'autres capables de ramasser le linge sale, le mettre dans la machine et de vider cette dernière. Ils ne seront pas mis en

production de sitôt, mais on peut s'attendre à les voir dans nos maisons d'ici vingt ou trente ans – peut-être moins.

On a réalisé de fulgurants progrès dans le développement de robots capables de préparer des burgers, des pizzas ou des sushis. Et bien sûr, il en existe qui sont incroyablement rapides dans la préparation des cocktails. Il n'y a pas besoin d'une grande imagination pour prédire que leur prix va chuter au cours des 20 prochaines années, de sorte qu'ils seront abordables au grand public.

J'appelle cela la face « ennuyeuse » de la robotique, car elle se charge des tâches barbant, quotidiennes, fastidieuses et répétitives qui nous prennent aujourd'hui la plus grande partie du temps passé à domicile. Mais cela deviendra moins ennuyeux si nous pouvons nous reposer, les doigts de pied en éventail, pendant que les robots travaillent dans nos maisons connectées, connectés à l'« internet des objets » (voir chap. 8). Cependant, le grand problème est qu'à moins de vivre dans un palais, nous manquerons d'espace pour accueillir tous ces dispositifs. Pour prendre en charge toutes nos corvées, la vraie grande innovation serait le robot multitâche. Mais on n'en voit pas encore la couleur. Et de toute manière, la maison intelligente du futur pourrait bien intégrer les robots dans les appareils électroménagers et dans la structure même de la construction. Par exemple, la plaque de cuisson pourrait détecter que vous avez quitté la pièce il y a vingt minutes et éteindre le feu sous la poêle à frire.

Les robots soignants

Durant la dernière décennie, on a pu témoigner d'une multiplication rapide des robots employés dans les soins à la personne. Par rapport à l'année précédente, 2014 a vu se multiplier par six le nombre de robots actifs dans les soins aux individus âgés ou handicapés, selon la Fédération mondiale de robotique. Si nous nous y prenons bien, les conséquences pourraient être très positives – et très négatives si nous nous fourvoyons.

Nous devons nous méfier du développement des robots « nounous ». Nombre de fabricants asiatiques travaillent à la réalisation de ce rêve. Les robots sont équipés de jeux vidéo, de quiz, d'un système de reconnaissance faciale et de la parole ainsi que d'une rudimentaire capacité de conversation, afin de capter l'attention et l'intérêt des enfants en âge préscolaire. Afin de protéger l'enfant de tout danger ils sont équipés de contrôles visuels et sonores à l'intention des personnes en charge. Ces robots sont très tentants pour les parents absorbés dans leur activité professionnelle, et leurs prix sont en baisse. Les plus abordables connaissent déjà un relatif succès, comme le robot Hello Kitty qui coûte un peu plus de 2000 euros.

Le vieillissement de la population entraîne une demande encore plus grande pour le développement de robots qui se chargent des soins aux fragiles personnes âgées. Le Japon est en bonne route pour pourvoir des soins assistés par la robotique, avec le robot-nourrisseur automatique « My Spoon » (« ma cuillère ») de l'entreprise Secom, le robot-baignoire qui lave et rince de Sanyo electric, le robot Wakamura de Mitsubishi qui surveille et rappelle la prise de médicaments ou le robot Ri-man de Riken qui peut porter des êtres humains et obéir à des commandes vocales simples.

Confrontés aux mêmes problèmes de population vieillissante, l'Europe et les États-Unis emboîtent le pas au Japon.

Comme pour toute technologie émergente, nous devons considérer les risques possibles et les problèmes éthiques. De nombreuses applications robotiques pourraient s'avérer extrêmement bénéfiques aux enfants et aux personnes âgées. Les soins assistés par technologie robotique peuvent offrir une plus grande indépendance aux personnes âgées qui souffrent de démence sénile et d'autres symptômes du vieillissement cérébral. Cela pourrait permettre à nos aînés vulnérables d'échapper plus longtemps aux institutions de soin. De plus, les robots se sont avérés utiles pour les enfants qui ont des besoins particuliers.

Les robots invitent naturellement à l'engagement de soi. Cette caractéristique en fait des ambassadeurs sans égal afin de susciter l'intérêt des enfants pour les sciences et l'ingénierie, ou pour faciliter les interactions sociales chez les personnes âgées. Mais nous devons faire attention à ce que cela ne finisse pas par empiéter sur les droits de ces deux groupes vulnérables, les très jeunes et les aînés. Notre société a un devoir d'assistance et la responsabilité morale de donner le meilleur d'elle-même pour assurer le bien-être émotionnel et psychologique de chacun de ses membres, quel que soit son âge. Un regard vers l'avenir nous confirme que beaucoup de robots *assisteront* les soins. Mais nous devons nous assurer que la *pratique* des soins reste confiée aux humains.

Les robots dans les conflits armés et le maintien de l'ordre

On sera à peine surpris d'apprendre que les militaires du monde entier lorgnent les robots pour les assister dans les conflits armés. Parmi les utilisations louables, on peut citer le déminage, l'évacuation des soldats blessés du champ de bataille ou une surveillance aérienne détaillée à portée de clavier.

Mais dans de nombreux pays, des efforts massifs sont déployés pour développer des robots tueurs sans supervision humaine. Selon le ministère de la Défense des États-Unis, les systèmes d'armes autonomes, une fois lancés, peuvent sélectionner et attaquer leur cible sans autre intervention humaine. La Chine, la Russie, les États-Unis et Israël sont engagés dans une course pour fabriquer des appareils robotisés tels que des tanks, des avions de chasse, des sous-marins et des navires, qu'on prévoit d'utiliser en essaims coordonnés.

De tels armements remettent en cause le droit international humanitaire (les lois relatives aux conflits armés comme les Conventions de Genève). Ils constituent une menace majeure pour la sécurité mondiale. Au-delà de la question morale de la guerre elle-même, beaucoup pensent qu'il est moralement inacceptable de confier à une machine la décision de tuer un être humain. Ces dernières années, j'ai activement participé à une large alliance internationale d'ONG et de récipiendaires du Nobel. Nous avons fait campagne auprès des Nations Unies et accompli de notables progrès pour que soit signé un nouveau traité qui bannit le développement et l'utilisation de telles machines.

Mais un traité international s'appliquera aux conflits militaires et non au maintien de l'ordre civil. Les forces de police utilisent depuis plus de dix ans des robots comme auxiliaires de déminage, pour la

libération d'otages, les fusillades ou la surveillance et la collecte de renseignements. Cela semble tout à fait raisonnable, mais les défenseurs des droits de l'homme s'inquiètent de la tendance croissante à équiper ces robots avec des armes dites « moins que létales ». Depuis 2014, l'entreprise sud-africaine Desert Wolf vend des drones Skunk munis de quatre fusils à paintball, qui peuvent tirer 80 projectiles irritants au poivre à la seconde. Pour répondre à la demande accrue, la compagnie a ouvert des sites de production à Oman et au Brésil. Les drones civils armés se répandent rapidement. Aux États-Unis, l'État du Dakota du Nord a récemment voté la Loi 1328, qui autorise la police à équiper ses drones quadrirotors avec des « armes moins que létales » comme les Tasers (qui s'avèrent tout de même mortels en certaines circonstances).

D'autres forces de police américaines bricolent des robots armés depuis des années. Le premier tué était un présumé sniper à Dallas, en juin 2016. Cette action bénéficiait d'une claire justification et les experts en droit l'ont déclarée légale. Mais nous pourrions avoir franchi une ligne rouge. Nous devons protéger nos forces de police, mais celles-ci, autant que faire se peut, doivent employer des moyens non violents. Quand ces moyens s'avèrent inefficaces, il faut graduellement augmenter la force de la réponse, et veiller à ce qu'elle reste proportionnelle à la gravité du crime. De telles prises de décisions constituent un énorme défi pour les robots autonomes.

Actuellement développés pour les conflits armés, les robots autonomes militaires pourraient revenir hanter le monde civil. Dans des circonstances appropriées comme les menaces terroristes, les robots pourraient être utilisés en grand nombre pour « protéger » les

citoyens. Ils pourraient devenir des outils essentiels pour identifier et suivre de nombreuses personnes. Si les menaces d'attaques persistaient, il deviendrait difficile de s'en passer. Les robots confèreraient à la police des pouvoirs étendus, lesquels pourraient aisément conduire à des abus dans n'importe quelle société. Ce n'est pas l'avenir que nous devrions vouloir.

Les robots qui prennent votre travail

D'innombrables rapports prédisent que l'IA et la robotique vont causer un chômage de masse d'ici deux décennies. En 2013, des universitaires prévoyaient que 47% de tous les emplois aux États-Unis pourraient être automatisés dans les vingt ans ; en 2014, on aboutissait aux mêmes résultats avec le cabinet d'audit Deloitte ainsi que des études britanniques, suisses et hollandaises. Des banques américaines, britanniques et italiennes ont fait part de leurs graves préoccupations.

Y a-t-il une solution ? Non, mais un certain nombre de mesures pourraient aider. D'aucuns ont suggéré que les robots devraient être complémentaires des capacités et savoir-faire humains. Ainsi, on pourrait utiliser les robots pour nous remplacer ou nous assister dans une partie d'un travail plutôt que de se substituer totalement dans un métier ou une activité. Mais beaucoup sont ceux qui pourraient se retrouver sans emploi, avec la chute des coûts de la robotique et la multiplication des tâches prises en charge.

On a émis de nombreuses suggestions pour répondre à un déplacement d'emplois massif. Bill Gates, le fondateur de Microsoft, a formulé l'idée que les entreprises paient une taxe quand un robot

occupe la place d'un être humain. Cela financerait un revenu universel de base, qui pourrait prendre diverses formes. Par exemple, on pourrait donner à chacun la même somme et en retirer une partie pour chaque dollar gagné. Bien que de nombreuses expériences soient en cours, aucun pays n'a encore introduit de revenu universel de base.

Pour beaucoup d'entre nous, il est possible que cette robotisation conduise à un futur dystopique de pauvreté et de destitution. Mais cela pourrait aussi inaugurer un horizon utopique où nous aurions beaucoup de liberté pour disposer de notre temps comme nous l'entendons. Seul l'avenir le dira.

Les robots qui réparent les dommages climatiques

Alors que les conséquences du changement climatique (voir [chap. 3](#)) commencent à se faire sentir, les prédictions montrent que les ressources en nourriture et en eau ne suffiront pas à l'accroissement de la population mondiale. La bonne nouvelle est que les robots pourraient nous aider à atténuer et prévenir certains dommages.

Les robots sous-marins vont là où les humains ne le peuvent pas – le long des profondes colonnes d'eau océanique qui contiennent des indices cruciaux sur le réchauffement global. À l'Institut de recherche de l'Aquarium de la baie de Monterey, à Moss Landing (Californie), les biologistes marins sont à la pointe de la recherche en la matière. Leurs véhicules sous-marins, comme le Paragon, se chargent des travaux fastidieux de l'océanographie

actuelle. Et des robots submersibles sont employés à la détection et à la réparation des dommages aux récifs coralliens.

À l'Agence nationale de l'eau de Singapour, on utilise des robots-cygnes pour dépister un ensemble de composés chimiques et biologiques dans les réservoirs. Également à Singapour, un autre projet vise à développer des essaims de petits robots-tortues, afin de surveiller l'environnement océanique et de réduire l'impact des déversements de pétrole. Plusieurs groupes dans le monde, dont un en Écosse, travaillent sur des systèmes de robots submersibles permettant de diagnostiquer et de réparer les dommages aux récifs coralliens. Connus sous le nom de « *coralbots* », de tels robots travailleraient en essaims à la manière des abeilles ou des fourmis. Ils seraient programmés pour distinguer les coraux des autres objets marins. Ils pourraient réparer les coraux endommagés par les chaluts de fond ou par les catastrophes naturelles comme les ouragans en les rassemblant pièce par pièce, pour leur permettre de repousser.

À l'université de Michigan State, des bancs de poissons-robots aident à restaurer les Grands Lacs. Sans liaison filaire, ils transmettent aux responsables des ressources un flux régulier de données sur la qualité des eaux. Ces poissons transportent des capteurs qui détectent les polluants et enregistrent la température ou le niveau d'oxygénation.

L'Association écossaise pour la science marine travaille sur son propre aéronef piloté à distance. Elle compte ainsi observer certains des territoires arctiques les plus inaccessibles et dangereux afin d'étudier les causes de la fonte des glaces. L'avion-robot utilise la télémétrie laser et une caméra pour mesurer et photographier les

glaciers de la région polaire. Avec ce genre unique de collecte de données par des glaciologues, nous sommes à la pointe de la recherche sur le réchauffement global.

Les robots jouent un rôle clé dans la détection des fuites de produits chimiques, qui représentent un danger majeur pour l'homme et l'écosystème : dégazages pétroliers, échappements de méthane explosif dans les pipelines fissurés ou de produits toxiques dans les canalisations industrielles. Se pose aussi la question, loin d'être négligeable, des fuites dans les pipelines d'approvisionnement en eau – jusqu'à 25% de l'eau potable la plus précieuse au monde est perdue. Dans les Émirats arabes unis, un drone aérien permet de réduire ce gaspillage de près de 10%, en détectant les fuites.

La technologie des robots peut améliorer la production agricole, tout en réduisant les dégâts qu'elle cause à son environnement immédiat. Des drones sont employés pour surveiller la maturité des récoltes et éviter le gaspillage de nourriture. Des machines agricoles robotisées autonomes augmentent l'efficacité de la production alimentaire et présentent un meilleur rendement énergétique.

À l'avenir, les deux tâches les plus importantes des robots pourraient bien être la protection de l'environnement et la production agricole. Avec des financements appropriés et une volonté internationale, ces robots pourraient devenir les sauveurs de l'humanité.

Notre avenir avec les robots

Ce ne sont que quelques-uns des domaines dans lesquels les robots auront un impact significatif sur nos vies dans les décennies à

venir. Il y en aura d'autres, que nous ne pouvons pas même imaginer. Mais cela devrait suffire à montrer l'énorme difficulté à prédire l'avenir de la robotique. Certains de ces futurs possibles sont des dystopies lugubres (peut-être à l'excès), tandis que d'autres sont des utopies merveilleuses et par trop optimistes. Les gouvernements commencent à peine à prêter attention aux problèmes de la robotique, et le Parlement européen a récemment adopté un premier rapport précisant ce à quoi devrait ressembler une loi sur le sujet. Mais quelles que soient les nouvelles lois et réglementations, c'est à nous qu'il incombe en définitive d'être attentifs au monde de la robotique, à la fois en tant que consommateurs et en tant que citoyens, pour nous assurer un avenir réjouissant avec les robots. Un avenir qui porte des fruits au bénéfice de tous.

L'AVENIR

LOINTAIN

Voyages dans le temps,
apocalypse et vie dans l'espace

16 Voyages interstellaires et colonisation du système solaire

Louisa Preston

Depuis l'an 2000, l'humanité s'est installée dans l'espace, bien que sa colonie n'ait jamais compté plus de dix personnes. La Station spatiale internationale est notre premier avant-poste extraterrestre – un satellite habité en orbite autour de la Terre. En 2017, nous ne sommes pas encore établis sur un sol extraterrestre. Mais l'idée qu'un jour les humains voyagent et résident dans d'autres parties de notre galaxie ne relève pas uniquement de la science-fiction. Elle appartient à notre représentation du destin de l'humanité, et s'est même transformée en jalon de nos succès à venir. Parmi les raisons pour que l'humanité aille dans le cosmos, la plus importante est sans doute le progrès de nos connaissances sur l'univers et sur notre place en son sein. Mais ce n'est pas la seule. Le temps viendra peut-être où la Terre ne pourra plus héberger notre population grandissante. Pour survivre en tant qu'espèce – et protéger les formes de vies avec lesquelles nous partageons notre planète – cela deviendra une nécessité. L'espace est aussi rempli de matériaux utiles et de sources d'énergie, il peut nous offrir des ressources virtuellement illimitées. Mais avant que nous puissions en tirer profit,

nous devons accomplir de nombreux progrès culturels et technologiques.

Propulseurs enclenchés !

Plus nous comprenons l'immensité de l'univers – ou du moins plus nous commençons à l'appréhender – plus nous réalisons l'ampleur des avancements que nous devons accomplir en tant qu'espèce. Nous ne pouvons pas changer les distances requises pour atteindre même les étoiles les plus proches – notre voisine immédiate, Alpha du Centaure, se trouve à 4,3 années-lumière, soit 40 000 milliards de kilomètres. Même avec notre véhicule spatial le plus rapide – *Voyager*, qui se déplace à 18 km par seconde – le trajet prendrait plus de 70 000 ans. Pour paraphraser le lieutenant Scott dans *Star Trek*, « impossible, commandant – nous n'avons pas la puissance ! ». Par conséquent, l'un des premiers objectifs est de concevoir et d'améliorer des technologies, en théorie comme en pratique, pour nous propulser plus loin et plus rapidement dans le cosmos. Par où devrions-nous commencer ?

Notre bon vieux moyen de transport interstellaire est la *fusée chimique*. Elle utilise la combustion de carburants pour produire des gaz d'échappement, lesquels sont accélérés à travers une tuyère pour générer une poussée. À présent, nous ne pouvons plus améliorer ces propulseurs pour nos aventures spatiales : nous avons déjà optimisé le rendement énergétique des liaisons chimiques du carburant. Cependant, la technologie sera utile pour produire de l'énergie sur la planète de destination, quand bien même le problème reste de rejoindre cette planète en un temps raisonnable.

Nous employons aussi des *moteurs électrothermiques* mais la poussée qu'ils délivrent est extrêmement faible. On les emploie depuis les années 70 pour orienter les satellites mais ils ne sauraient être un bon choix pour explorer la galaxie. À l'avenir, nous nous voyagerons peut-être à travers l'espace avec des *moteurs ioniques* et des *voiles solaires*. Dans un propulseur ionique, les molécules d'un carburant non réactif reçoivent des charges positives ou négatives, c'est-à-dire qu'elles sont ionisées, et accélérées par un champ électrique avant d'être éjectées à l'arrière du vaisseau. La puissance de départ est très faible, mais sur la durée d'une mission au long cours, le moteur peut délivrer 10 fois plus de poussée par kilogramme de fuel qu'une fusée chimique. Le propulseur ionique pourrait nous permettre de rallier Mars en 39 jours, au lieu des six à huit mois actuels. La sonde spatiale *Dawn*, qui tourne autour de la planète naine Cérès, utilise en ce moment de tels propulseurs. Ils lui ont permis d'être le premier véhicule spatial à être entré puis sorti de l'orbite de plusieurs corps célestes. Quant à elles, les voiles solaires exploitent le flux lumineux du Soleil qui engendre ce qu'on appelle une pression de rayonnement, laquelle peut fournir une poussée significative. Équipé d'une voile suffisamment grande, un vaisseau spatial pourrait atteindre des vitesses de pointe incroyables sans le moindre carburant. Mais à mesure qu'il s'éloigne du système solaire, la lumière du Soleil s'amenuise inévitablement et la poussée disponible décroît. Nous aurions donc besoin d'une forme de carburant additionnel pour maintenir le cap et, finalement, pour freiner le vaisseau.

Il existe d'autres options possibles qui pourraient nous aider à devenir une espèce intergalactique. Par exemple, on peut

mentionner les moteurs à propulsion par plasma (dans les grandes lignes, des moteurs ioniques sous stéroïdes), la fission thermique, les moteurs à fusion continue ou pulsée – qui tentent de reproduire l'énergie du Soleil – et à l'extrémité du spectre de la faisabilité, les moteurs à antimatière. L'antimatière est une substance composée de particules subatomiques dont les charges électriques sont opposées à celle de la matière courante. En conséquence, quand de l'anti-matière entre en contact avec de la matière normale, les deux s'annihilent mutuellement et produisent une bouffée de pure énergie. De tous les processus connus, ce processus génère la plus forte densité d'énergie : un système de propulsion à l'antimatière serait de très loin le plus efficace pour les voyages interstellaires. En 2006, le *Institute for Advanced Concepts* de la NASA a financé une équipe pour qu'elle examine la faisabilité d'un vaisseau spatial propulsé à l'antimatière. Ils ont calculé que seuls 10 milligrammes d'antimatière seraient suffisants pour envoyer un vaisseau vers Mars en 45 jours. Toutefois, le problème réside dans la fabrication d'antimatière en quantité suffisante. À ce jour dans l'ensemble des laboratoires du monde entier, on en a produit tout juste de quoi se chauffer une tasse de thé.

Une maison loin de chez soi

Plus les vaisseaux que nous construirons seront rapides et puissants, et plus nous aurons des chances d'atteindre les étoiles. Le but serait qu'ils puissent transporter un équipage à travers l'espace à des vitesses approchant celle de la lumière. Cela aurait deux clairs avantages. Le plus évident est que le voyage prendrait

moins de temps – il ne faudrait que quelques années pour atteindre les étoiles les plus proches. Mais de plus, à 99,5% de la vitesse de la lumière, le temps lui-même ralenti d'un facteur 10 suivant la théorie de la relativité d'Einstein : un astronaute ne vieillirait que de 10 ans durant un voyage interstellaire d'un siècle et de 100 années-lumière. L'inconvénient est que les astronautes retourneraient sur une Terre où tout le monde aurait pris 100 ans d'âge. Un vaisseau de ce genre aurait besoin d'un moteur capable d'une poussée incroyable. Il lui faudrait aussi un blindage conséquent qui puisse protéger l'appareil et l'équipage des collisions à haute vitesse avec des astéroïdes et autres débris spatiaux. Sinon, plutôt que de viser la vitesse, nous pourrions ralentir et accepter la durée du voyage. Une arche interstellaire qui voyagerait à une vitesse beaucoup plus faible – disons 0,2% de la vitesse de la lumière – pourrait rejoindre quelques douzaines d'étoiles en 10 000 ans. Mais cela demanderait d'engager de nombreuses générations d'êtres humains à bord d'un *vaisseau générationnel*.

Celui-ci transporterait plusieurs milliers d'habitants – des générations et des générations de voyageurs célestes. Il serait suffisamment durable pour affronter les rigueurs de l'espace pendant des millénaires. Il devrait être totalement autosuffisant et fournir l'énergie, la nourriture, l'air et l'eau à chacun des occupants. Il serait équipé de systèmes extraordinairement fiables que les passagers pourraient maintenir eux-mêmes pendant de très longues périodes. L'équipage serait essentiellement composé de familles, avec des enfants nés à bord, formés pour remplacer leurs parents et leurs grands-parents dans le pilotage et la maintenance du vaisseau à mesure que ces derniers vieilliraient et mouraient. Ces arches

seraient confrontées à de fondamentales questions biologiques, sociales et morales, en particulier concernant la valeur de la vie humaine, la gouvernance et la finalité – les premières générations de pionniers ne verraient pas l'aboutissement de leur mission ; les générations intermédiaires seraient destinées à vivre et à mourir en transit, sans voir le résultat tangible de leurs efforts. Comment cette génération d'« enfants du milieu » ressentirait-elle et s'adapterait-elle à cette existence de contrainte, confinée dans le vaisseau ?

Il y a peut-être de meilleures options pour résoudre ce problème. Nous pourrions mettre tout ou partie de l'équipage en hibernation – ou en état de vie suspendue – dans des sortes de *vaisseaux-couchettes*. Ainsi tous les passagers seraient encore en vie au terme du voyage. Nous pourrions aussi concevoir un vaisseau interstellaire qui transporterait à destination des embryons ou de l'ADN humain congelé ou dormant. Mais cette méthode soulève d'évidents problèmes quant à la naissance et à l'éducation de ces individus. Tout compte fait, il serait préférable que les vaisseaux permettent une durée de trajet comparable à celle d'une vie humaine. Le physicien théoricien Freeman Dyson a conceptualisé un tel vaisseau avec le *Projet Orion*, propulsé par des explosions atomiques et alimenté en énergie par la fusion ou la fission nucléaire. Finalement, nous pourrions construire des vaisseaux dirigés par des rayons laser émis depuis le système solaire. Stephen Hawking, Yuri Milner et Mark Zuckerberg sont partisans de ce concept baptisé *Breakthrough Starshot* – un projet visant à construire le prototype d'un petit vaisseau robotisé, propulsé par la lumière et capable de rejoindre Alpha du Centaure. Ils prévoient un lancement dans moins de vingt ans. Le vaisseau *Starshot* consistera

en une puce de la taille d'une galette, attachée à une voile extra-fine. Cet attelage sera largué dans l'espace depuis un vaisseau mère et propulsé vers les étoiles à une vitesse atteignant 20% de la vitesse de la lumière, par des rayons laser émis depuis des installations situées sur Terre, en haute altitude. À cette vitesse il lui faudrait vingt ans.

Peut-être la meilleure option n'est-elle pas d'attendre que la technologie puisse réaliser nos rêves cosmiques. Et si la science-fiction avait déjà trouvé la réponse ? Nous pourrions nous inspirer des solutions évoquées dans les films *Contact* ou *Interstellar* par exemple, et « simplement » trouver un trou de ver. Aussi improbable que cela paraisse, nous ne pouvons pas exclure la possibilité théorique de sauter à l'envi d'un bout à l'autre de la Galaxie à travers des trous de vers. Mais même si nous devions effectivement en découvrir un, nous n'avons aucune preuve qu'une telle méthode soit praticable – et encore moins sans risque pour de fragiles et douillettes créatures dans notre genre.

Fragilités humaines

Hormis des coûts immenses et tous les développements technologiques et scientifiques à faire, un autre grand défi de l'exploration spatiale réside dans la fragilité du corps humain. Il nous faut bien comprendre comment un trajet au long cours dans l'espace peut affecter notre délicate physiologie si l'on veut que les futurs voyageurs interstellaires survivent sur une période longue, voire indéfinie. Pour nous aider dans cette recherche, nous devons tester et évaluer la fiabilité des technologies destinées à protéger le corps

humain contre les dangers de l'espace. Nos cobayes actuels sont les astronautes à bord de l'ISS.

Les êtres humains ont besoin de systèmes de survie artificiels à même de fournir l'air, l'eau et la nourriture, et de maintenir des températures et pressions confortables à l'intérieur des vaisseaux. Ces derniers doivent pourvoir abri et protection contre les dangers des rayons solaires et cosmiques, ou contre les collisions avec les micrométéorites et autres débris dans l'espace. La science-fiction a décrit des stations spatiales avec des structures rigides en rotation qui créent une force centrifuge et reproduisent une gravité artificielle. Mais nous n'avons pas encore construit ni envoyé dans l'espace de telles structures, principalement à cause de la taille requise pour un tel vaisseau. Actuellement, nous devons donc prendre en compte l'absence de gravité dans l'espace, puisque nous ne pouvons encore l'éviter ni nous en prémunir. Le corps humain montre de remarquables capacités d'adaptation à l'absence de gravité. Mais plus le séjour dans l'espace se prolonge, plus importantes sont les conséquences durables du manque de gravité sur le corps. La très faible gravité évite au corps les efforts pour contrebalancer l'attraction terrestre. Ce relâchement entraîne notamment une perte musculaire et une détérioration de la masse osseuse, où le calcium s'échappe lentement des os et quitte l'organisme par les urines. Les os se dégradent peu à peu comme dans une ostéoporose accélérée. Flotter dans l'espace semble être la plus reposante et la plus amusante des activités, mais si l'astronaute se limitait à cela, il fondrait proprement. Lors d'un séjour spatial, les astronautes voient également leur colonne vertébrale s'allonger jusqu'à 2,5 centimètres. Suite à la remontée des fluides corporels, leur visage enfle

littéralement comme une face de lune – ce qui entraîne des problèmes oculaires. Par chance, ces affections sont la plupart réversibles dès que l'astronaute est à nouveau soumis à la gravité terrestre. Mais que se passerait-il durant un long trajet, où ce ne serait plus une option ? Qu'advierait-il pendant un voyage de plusieurs générations ou si la planète de destination présentait une plus faible attraction ?

Enfin, et ce n'est pas le moindre des problèmes, la vie dans le cosmos implique un défaut caractéristique d'espace privé. Les problèmes les plus connus sont l'isolation à long terme, la monotonie, la mobilité limitée, des cycles de sommeil perturbés, une réduction de l'hygiène personnelle ainsi qu'une extrême promiscuité avec toujours les mêmes gens. Dans l'espace, la vie privée est un luxe. Le seul exemple d'avant-poste extraterrestre, l'ISS, équivaut à un logement de cinq ou six pièces. Malgré cela, il est difficile tant physiquement que mentalement de devoir y demeurer pendant six mois ou plus. Nous supposons et espérons que pour toute mission spatiale au long cours, le vaisseau serait beaucoup plus grand que l'ISS. Vivre dans l'espace implique l'exposition à des risques quotidiens et peut potentiellement conduire à la dépression, l'insomnie, l'anxiété, des conflits interpersonnels et même des psychoses. Mais les astronautes sont bien préparés pour affronter ces menaces, comme le serait l'équipage de n'importe quelle mission de longue durée. Finalement, ce n'est un secret pour personne que la nourriture spatiale préconditionnée et déshydratée manque de saveur ; la crème glacée spatiale est sans comparaison avec celle qu'on déguste sur Terre ; le seul assaisonnement disponible est du poivre en suspension dans de l'huile d'olive, afin

d'éviter qu'il ne se répande dans toute la station. Manger tous les jours les mêmes repas sommaires peut entraîner une perte d'appétence – un problème connu de ceux qui vivent avec des rations limitées. L'ennui gastronomique risque d'altérer l'appétit des astronautes, qui pourraient réduire leur apport en calories et subir perte de poids et malnutrition. Les missions de longue durée devraient offrir un vaste choix de repas frais et goûteux.

Avant-postes extraterrestres

Arrêtons-nous un instant et considérons le chemin parcouru par l'humanité malgré toutes les prophéties énoncées plus haut. Depuis que Youri Gagarine a accompli le premier voyage d'un être humain dans l'espace en 1961, nous sommes allés sur la Lune et des robots ont exploré Vénus et Mars. Nous avons examiné les astéroïdes les plus grands ; pris des photographies en gros plan de Jupiter et de ses lunes géantes ; navigué à travers les anneaux de Saturne et les jets glacés de son satellite Encelade ; pris des clichés détaillés d'Uranus et Neptune ; révélé la beauté glaciale de Pluton ; atterris sur une comète filant à toute allure vers le Soleil. Notre exploration préliminaire du système solaire nous a bien préparés, et nous pouvons désormais sérieusement envisager l'implantation d'une colonie extraterrestre autonome. Mais à notre niveau technologique actuel, la construction d'un établissement sur un autre monde que la Terre soulève un nombre gigantesque de problèmes. Nous devons les résoudre si nous voulons vraiment maintenir des centaines, voire des milliers de gens en vie dans un environnement très certainement hostile à la vie humaine.

La Lune

Pour le moment, les destinations les plus réalistes pour une colonisation sont les mondes les plus proches de nous. Notre première escale pourrait bien être la Lune – un camp de base idéal pour rassembler matériel équipements et personnel hors de la gravitation terrestre. Cela permettrait aussi d'évaluer sur le terrain les technologies grâce auxquelles vivraient des humains dans d'autres mondes. Une base lunaire pourrait faciliter l'organisation de missions plus éloignées, vers Mars et au-delà. Elle pourrait même donner naissance au business du tourisme spatial. Mais la mise sur pied d'un habitat lunaire n'est pas une mince affaire, tout particulièrement quand la gravité n'est que d'un sixième de celle sur Terre. Nous devons prendre garde aux matériaux de construction : comment se comporteront-ils dans le vide ? Comment les renforcer afin qu'ils encaissent les impacts des micrométéorites lancées à 10 km par seconde ? Et comment réagiront-ils aux variations extrêmes de température entre le jour (120 °C) et la nuit (jusqu'à -153 °C) ?

Comme toutes demeures extraterrestres, les bases lunaires assureront la survie de leurs futurs habitants. Elles devront fournir de l'air respirable pressurisé, de l'eau, un environnement dans lequel faire pousser la nourriture, une protection contre la brutalité des radiations solaires ainsi que de la lumière, de la chaleur et de l'énergie durant les nuits lunaires, longues de deux semaines terrestres. En 2009, la sonde indienne Chandrayaan-I a découvert près du pôle Nord de la Lune plus de quarante cratères plongés en permanence dans le noir. Ils contiennent environ 600 millions de tonnes de glace d'eau – une ressource qui pourrait être exploitée par une colonie. Un habitat autonome recyclerait 90% de cette eau,

produirait du dioxyde de carbone (CO_2) acheminé dans des serres et utilisé par les plantes, lesquelles rejetteraient de l'oxygène lors de la photosynthèse, qui serait réutilisé dans l'habitat.

Mars

Bien que la Lune soit plus proche, il semble que ce soit Mars qui occupe dans notre imagination le statut de futur avant-poste. Même l'entrepreneur Elon Musk a des plans pour envoyer un million de personnes sur Mars dans les 50 à 100 prochaines années, avec le système de transport interplanétaire *Space X* – un ensemble d'infrastructures et de technologies dédiées au vol spatial, conçues pour l'exploration humaine et la colonisation. Des robots terrestres ont sillonné Mars depuis quarante ans. Ils nous ont permis de mieux connaître non seulement notre propre histoire, mais aussi ce qui nous attend à sa surface. Malgré sa réputation, Mars offre après la Terre l'environnement le plus clément – on pourrait presque dire le plus accueillant – du système solaire. La construction d'une base est un but raisonnable... Mais seulement dans l'hypothèse où nous saurions surmonter les obstacles physiques pour que des hommes atteignent la Planète rouge. Mentionnons un voyage de près de 300 jours, des risques liés aux radiations, un séjour prolongé en microgravité et un atterrissage extraordinairement dangereux (actuellement, les sondes inhabitées ne se posent sans problème et d'une seule pièce que dans 30% des cas). Mais une fois là-bas, nous aurions de bien meilleures conditions de vie que sur la Lune.

Le jour martien a une durée similaire au nôtre. Mars est penché sur son axe de rotation suivant un angle comparable à celui de la

Terre, ce qui crée également des saisons. Cette planète possède une atmosphère (quoique ténue), de la glace d'eau et des environnements habitables. Le climat constitue néanmoins la principale difficulté à surmonter. L'atmosphère martienne est composée à 95% de dioxyde de carbone. Cela veut dire qu'elle est toxique pour les êtres humains. Avec la faible pression atmosphérique (0,006 atm), notre existence à la surface de la planète est impossible sans assistance. En outre, la gravité n'y est que de 38% de celle de la Terre, il y fait toujours froid (entre -85°C et -5°C) et il n'y a pas d'eau liquide à la surface. Où habiterions-nous sur Mars ? Outre la demeure stéréotypique – un dôme gonflable posé à la surface – il existe aussi sur Mars des cratères d'impact et des tubes de lave qui pourraient servir à construire des habitats. En effet, ceux-ci permettraient l'assemblage de plus grandes structures pour une installation à long terme (la seule vraie façon de vivre sur Mars) et fourniraient une protection décente contre l'environnement extérieur. De telles structures pourraient être déployées en plusieurs étapes au cours d'une série de missions, pièce par pièce, comme on l'a fait pour l'ISS. Ces habitats devraient être autonomes dès le premier jour et permettre de faire pousser de la nourriture, d'extraire l'eau et de produire de l'oxygène. Les premiers Martiens appartiendront donc à deux types d'espèces – des plantes et des hommes – qui sont de parfaits compagnons de voyage, s'échangeant dioxyde de carbone et oxygène pour se maintenir l'un l'autre en vie.

Vénus et lunes de glace

Nous ne pouvons pas totalement ignorer d'autres intéressants candidats planétaires malgré les évidents obstacles à leur colonisation. Faire atterrir des humains sur Vénus est bien au-delà de nos capacités technologiques et physiologiques actuelles. À sa surface, nos corps fragiles seraient détruits en moins de 10 secondes – instantanément écrasés par une pression atmosphérique de 92 bars en même temps qu'incinérés à 465 °C. En outre, notre dernier souffle serait composé de gaz toxiques. La vie sur Vénus serait brutale, torride, empoisonnée et brève. On pourrait néanmoins mettre à profit les conditions extrêmes régnant sur la planète, en flottant à haute altitude dans la dense atmosphère vénusienne, là où les gaz présentent la même composition que sur Terre. À 50 km au-dessus de la surface de Vénus, la pression atmosphérique est identique à celle de la Terre au niveau de la mer (1 bar). À cette altitude, les températures sont à peine supérieures à 0 °C. Si un tel habitat était possible, un être humain pourrait s'y aventurer avec simplement un masque à oxygène, et contempler une mer de nuages au-dessous.

En orbite autour des géantes gazeuses Jupiter et Saturne, deux lunes présentent aussi un intérêt, du moins en théorie. Si les explorateurs installaient une base sur Europe, satellite de Jupiter, sa surface glacée (jusqu'à -220 °C) serait parfaitement adaptée (nous pourrions approcher le problème de la même manière qu'en Antarctique). Mais la magnétosphère de Jupiter bombarde Europe de radiations mortelles, ce qui constituerait une menace sérieuse pour la vie. Le meilleur emplacement se trouve donc soit sous la couche de glace d'Europe, soit sur la face cachée du satellite, recevant moins de radiations. Comme la Lune avec la Terre, Europe

montre toujours la même face à Jupiter. Sur le satellite de Saturne, Titan, les colons n'auraient pas besoin de scaphandre pressurisé – simplement d'une bouteille d'oxygène et de vêtements chauds. Parce que son atmosphère est très dense, se tenir sur Titan devrait fournir des sensations analogues à celles que l'on expérimente dans une piscine. Le relief ressemble à celui de la Terre, et il présente des plaines qui pourraient accueillir une colonie. Les avantages de Titan ont de quoi séduire : il possède en abondance tous les éléments nécessaires à la vie, dont de l'eau sous forme de glace.

Conclusions

Si l'on part de notre niveau technologique actuel, il est difficile d'imaginer ce que pourrait être le développement de l'exploration spatiale à moyen ou à long terme. À un moment donné, il nous faut distinguer le possible du probable, le réaliste du fantasmagorique et la science factuelle de la science-fiction. Nous savons que nous avons besoin de meilleures solutions de propulsion pour surmonter l'obstacle des vastes distances. Les financements et la volonté ne sont pas de moindres problèmes. Il s'agit, pendant des années, de créer et d'opter pour les technologies à même d'accomplir une mission – littéralement les véhicules du changement – ainsi que de développer et de déployer des robots pour sonder les possibles endroits adéquats. Le problème n'est pas de sélectionner l'équipage (cette question se poserait plus tard), mais de choisir de potentiels « mondes cibles ». Sur notre propre planète, même pour de simples projets d'ingénierie, nous ne prenons pas de décision avant de nous

être livrés à des investigations préliminaires, à l'exploration des sites, à l'échantillonnage et à l'analyse de l'environnement.

Ce que nous savons de l'exploration spatiale, c'est qu'elle est aussi dangereuse que coûteuse. Nous savons que les êtres humains sont fragiles, vulnérables, exigeants quant à leur environnement, qu'ils ont besoin de nourriture, d'eau et d'oxygène, qu'ils sont mal adaptés au contexte spatial et qu'ils détestent risquer leur vie. De leur côté, nos fidèles robots explorateurs sont beaucoup moins difficiles. Ils peuvent durer pendant des décennies, voire plus, et nécessitent une protection et une maintenance relativement minimales. Il n'est pas surprenant que nous ayons préféré ces loyaux engins pour mener à notre place des missions de reconnaissance, d'autant qu'ils deviennent de plus en plus compétents et autonomes (grâce à nous). Les robots nous ont beaucoup appris sur notre propre Lune et sur Mars. Ils mettent en lumière les problèmes auxquels feraient face des visiteurs humains, et suggèrent des solutions. Mais dans l'espace, nous faisons preuve de flexibilité opérationnelle, d'inspiration et d'une intelligence innée – notre curiosité est (pour l'instant) hors de portée des machines. Il y a des centaines, et plus vraisemblablement des milliers d'environnements habitables dans des mondes à travers le système solaire et au-delà qui attendent que l'humanité vienne les visiter. Espérons que nous saurons mettre à profit notre désir de mondes nouveaux, non seulement pour l'exploration spatiale, mais aussi pour mieux comprendre comment vivre de manière durable sur cette Terre, notre maison.

17 Apocalypse

Lewis Dartnell

Tout ce qui n'est pas sauvegardé sera perdu.

Message de fermeture du jeu Nintendo

Super Mario Galaxy, extrait de

The End Games, par T. Michael Martin.

Dans cet ouvrage, de nombreux chapitres sont consacrés à ce qui se profile à l'horizon, que ce soit en termes de compréhension scientifique de l'univers ou de technologies qui pourraient révolutionner notre existence. Or je me demande ce qui pourrait arriver, si l'avenir ne devait pas suivre nos plans. Et si le futur ne se passait pas comme prévu ?

Pour appréhender ce qui pourrait advenir, nous pouvons nous tourner vers le passé et apprendre de notre propre Histoire. Au cours des millénaires, depuis que l'humanité a inventé l'agriculture et commencé à s'établir dans de florissantes bourgades et cités, beaucoup de civilisations se sont effondrées et ont disparu. En fait, il y a une sorte d'anomalie historique aux nombreux siècles de développement soutenus et de progrès technologique de notre propre civilisation. Quels sont les événements cataclysmiques qui pourraient entraîner une future apocalypse ? Plus crucialement encore, que pourrait-on faire aujourd'hui pour préserver la semence de nos savoirs modernes, afin que les survivants puissent redémarrer la civilisation le plus rapidement possible ?

L'effondrement de n'importe quelle grande civilisation résulte souvent d'une discontinuité historique pendant laquelle les connaissances se perdent dans les brumes du temps. À ce moment, la marche du progrès semble trébucher. L'exemple le plus fréquemment cité est celui des ténèbres qui ont suivi la chute de l'Empire romain d'Occident. Cette narration est un peu simpliste et clairement eurocentrique. Les progrès sociaux, technologiques et scientifiques se poursuivirent dans les mondes arabes et chinois. Même en Europe ils eurent lieu durant cette période de soi-disant stagnation qui suivit la chute de Rome. Car cette époque a malgré tout suscité de nombreuses avancées – citons par exemple les inventions de la charrue lourde, qui a révolutionné l'agriculture dans les sols argileux du nord de l'Europe, du moulin à vent ou de l'horloge mécanique. Il n'empêche que les premiers siècles du Moyen-Âge ont indiscutablement connu un cahot historique après la dissolution de l'Empire romain. Bien avant, l'est de la Méditerranée avait déjà vu s'effondrer la civilisation du bronze, avec une période de ténèbres aux alentours de 1100 av. J.-C. De par le monde, de nombreuses sociétés et cultures ont aussi traversé un apogée et un déclin : les Mayas, les Olmecs, la civilisation Rapa Nui de l'île de Pâques et celle de la vallée de l'Indus pour n'en citer que quelques-unes. Et ce serait faire preuve d'arrogance de penser que notre actuelle civilisation industrielle est en quelque sorte immunisée contre les chutes soudaines et qu'elle durera indéfiniment. Des anthropologues comme Joseph Tainter soutiennent même l'idée que plus les sociétés sont complexes et imbriquées, comme la nôtre, plus elles sont vulnérables aux effondrements soudains et catastrophiques.

Risques de catastrophe globale

Les civilisations s'effondrent pour de nombreuses raisons : à cause d'une guerre et d'une invasion, de catastrophes naturelles, ou de la surexploitation et la dégradation de leur environnement. On appelle « risques de catastrophe globale » les dangers qui pourraient menacer notre civilisation moderne et globalisée dans un futur proche. Ils vont du plausible (une pandémie) au peu probable (l'impact d'un astéroïde) ou même au totalement impossible (une attaque de zombies). Examinons en détail ici cinq possibilités réalistes.

Changement climatique

Il s'agit peut-être de la plus probable cause de l'écroulement du monde moderne. Nous savons que le changement climatique est déjà à l'œuvre et que nos propres activités en sont à l'origine – c'est-à-dire les émissions de dioxyde de carbone (et de méthane) de l'industrie, de l'agriculture et des transports. La température moyenne globale va continuer à monter, en même temps que s'élèvera le niveau de la mer à cause de l'expansion thermique des eaux et de la fonte de la banquise – et que les océans s'acidifieront en absorbant une partie du CO₂. Mais il y aura aussi des changements climatiques sévères à l'échelle régionale. Le réchauffement global redistribue les zones de pluie. Cela multiplie les inondations dans certains endroits et la sécheresse dans d'autres. Dans les deux cas, l'agriculture productive aura de sérieuses difficultés à faire pousser la nourriture dont a besoin une

population humaine en augmentation rapide. L'accès aux sources pérennes d'eau douce pourrait bientôt provoquer des bouffées de tensions géopolitiques – de même pour le pétrole et d'autres ressources naturelles prisées. Le futur n'est peut-être pas loin où se déclencheront les premières « guerres de l'eau ». Il est extrêmement difficile de prédire exactement la vitesse du changement climatique et ses effets locaux : l'atmosphère, les océans et les masses terrestres forment un système complexe de boucles de rétroactions. Piégée dans le pergélisol ou au fond des mers, une grande quantité de méthane fait l'objet d'inquiétudes particulières, le méthane étant un gaz à effet de serre vingt-cinq fois plus puissant que le dioxyde de carbone. Relâché dans l'atmosphère, il pourrait déclencher un soudain réchauffement. Le risque c'est que le changement climatique soit si rapide que nos infrastructures ne puissent pas s'adapter et que la civilisation moderne s'écroule.

Impacts d'astéroïde et de comète

La plupart des astéroïdes tournoient dans la ceinture située entre Mars et Jupiter. Mais l'orbite de quelques-uns d'entre eux les attire bien plus près de nous. Ce sont les astéroïdes dits « géocroiseurs ». Composés de métaux de valeurs, ils offrent la perspective de futures exploitations minières mais risquent aussi d'entrer en collision avec la Terre. En surveillant le ciel, nous pensons avoir identifié et suivi les objets qui représentent le plus grand danger potentiel. Nous avons ébauché plusieurs plans d'action pour qu'une mission puisse dévier un astéroïde menaçant vers une orbite plus sûre (avec des technologies similaires à celles de l'exploitation minière spatiale).

Par contre, le préavis serait bien plus court dans le cas d'un impact de comète – peut-être quelques mois seulement. Les comètes résident normalement dans les obscurs confins du système solaire. Mais elles peuvent recevoir une poussée gravitationnelle qui modifie leur orbite autour de notre étoile, ce qui peut les précipiter vers l'intérieur du système solaire et vers la Terre. Cela signifie que non seulement la comète aurait une très grande vitesse au moment de son impact, mais aussi que nos télescopes pourraient ne pas la détecter à temps pour que nous puissions tenter quelque chose. Les effets d'une collision avec un gros astéroïde ou une comète seraient dévastateurs. Si de tels objets tombaient dans l'océan, ils déclencheraient des tsunamis qui submergeraient les côtes. S'ils frappaient les terres émergées, ils soulèveraient dans l'atmosphère d'énormes quantités de roches pulvérisées et causeraient d'immenses incendies. Dans l'avenir immédiat, il y a peu de chances que la Terre reçoive un projectile de 10 km de diamètre comme celui que nous soupçonnons d'avoir provoqué une extinction massive il y a 65 millions d'années – le « tueur de dinosaures ». Cependant, un astéroïde ou une comète de seulement 1 km de diamètre pourraient dévaster une région importante, et même ébranler suffisamment le monde moderne pour amorcer son déclin final.

Supervolcans

À de nombreux égards, les effets d'une énorme éruption volcanique sont comparables à l'impact d'un astéroïde. Évidemment, si vous êtes trop proche, vous serez tué par les écoulements de lave, les nuages de cendres brûlantes, les chutes de pierres et les

émanations toxiques. Mais il y a matière à des inquiétudes d'ordre plus général. Une éruption suffisamment importante occasionnerait des effets mondiaux. Injectés dans la haute atmosphère, les cendres et les sulfures engloberaient la Terre et bloqueraient une partie de la lumière solaire, ce qui entraînerait un hiver volcanique de plusieurs années. À lui seul, cet effet pourrait détruire l'agriculture mondiale. À plus long terme, ce refroidissement soudain pourrait même provoquer un nouvel âge glaciaire. L'Histoire récente nous en a déjà fourni un avant-goût. En 1815, l'éruption du mont Tambora en Indonésie est à l'origine de ce que l'on a appelé « l'année sans été ». Elle a causé des pénuries alimentaires dans tout l'hémisphère nord. Certains scientifiques soutiennent qu'il y a 71 500 ans le Mont Toba (toujours en Indonésie, l'une des régions les plus volcaniques de la planète, située sur une zone de subduction entre plaques tectoniques) a peut-être causé un effondrement de la population humaine, qui aurait été réduite à quelques dizaines de milliers de survivants seulement. De nos jours, les vulcanologues surveillent attentivement l'énorme caldeira de 40 km de diamètre du parc national de Yellowstone, dans l'État du Wyoming aux États-Unis. Il y a 640 000 ans, la dernière éruption de ce supervolcan a couvert de cendre la plus grande partie de l'Amérique du Nord à l'ouest du Mississippi. Lorsque le supervolcan de Yellowstone entrera de nouveau en activité, il pourrait bousculer notre civilisation au point de précipiter son effondrement.

Éjections de masse coronale

Les impacts d'astéroïdes et de comètes ne sont pas les seuls périls extraterrestres qui pourraient déclencher une apocalypse. Si notre soleil est la source de pratiquement toute vie sur Terre, il représente aussi un danger pour notre monde moderne et technologique. Comme toutes les étoiles, il émet périodiquement d'immenses jets de son aura, appelées éjections de masse coronale. Des milliards de tonnes d'éruptions stellaires foncent à travers le système solaire sous forme de bulles de plasma d'ions et d'électrons, maintenus ensemble par un champ magnétique. Il existe une toute petite probabilité qu'une éjection se dirige directement vers la Terre. Si elle est puissante, elle pourrait avoir des effets catastrophiques. L'électronique et les panneaux photovoltaïques spatiaux sont très vulnérables aux soudaines ruées de particules des éjections. Une grave occurrence pourrait mettre hors service une importante partie de la flotte croissante de satellites dont nous sommes devenus totalement dépendants, que ce soit pour les télécommunications, l'observation de la Terre ou la navigation par GPS. Les signaux des satellites GPS doivent être d'une grande précision temporelle pour synchroniser de nombreux processus au sol, notamment les transactions financières dans l'économie moderne mondiale. Mais si une éjection solaire devait frapper le champ magnétique terrestre, ses effets pourraient compromettre encore plus largement nos modes de vie. Les perturbations sévères du champ magnétique induisent d'énormes courants dans les câbles des réseaux de distribution d'électricité et peuvent détruire les transformateurs. En 1859, une tempête solaire a frappé la Terre. Elle a généré des aurores boréales visibles loin des pôles, dévié les aiguilles des boussoles et allumé des incendies à partir d'étincelles sur les fils

télégraphiques. Et tout ceci est arrivé dans un monde essentiellement pré-électrique. Notre société moderne serait bien plus gravement atteinte ; les pannes de courant prolongées entraveraient les réparations. En 1989, une tempête solaire a causé un black-out massif dans toute la province du Québec. Pas plus tard qu'en 2012, il s'en est fallu d'un cheveu qu'une éjection ne frappe la Terre. Si elle nous avait atteints, elle aurait pu démolir une bonne partie de nos infrastructures modernes.

Pandémies mondiales

Les maladies infectieuses ont été un fléau de l'humanité tout au long de son histoire. Mais de temps à autre, une épidémie particulièrement virulente se propage au sein d'une large population – on parle alors de pandémie. On pense que la Peste noire provenait des steppes de l'Asie centrale. Transportée par les marchands sur la Route de la Soie puis par les rats à bord des navires de commerce, elle a atteint l'Europe médiévale en 1347. En quelques années, la peste a tué environ un tiers de la population européenne, et jusqu'à la moitié des habitants des zones urbaines, plus gravement touchées. On estime de 100 à 200 millions le nombre de victimes dans toute l'Eurasie. Dans l'histoire récente, la « Grippe espagnole » s'est déclarée en mars 1918, vers la toute fin de la Première Guerre mondiale. En à peine six mois, elle avait fait le tour de la planète et infecté environ un tiers de la population mondiale. Plus de 50 millions de personnes ont payé de leur vie son taux de mortalité particulièrement élevé. Si un virus hautement infectieux et létal devait apparaître dans le monde moderne, les

conséquences pourraient être bien plus graves. En effet, la majeure partie de l'espèce humaine est aujourd'hui urbaine. Nous habitons de denses métropoles qui offrent des conditions idéales à la propagation des contagions. Quant aux vols intercontinentaux, ils rendent bien plus difficiles les mesures de confinement et de quarantaine. Si même une fraction minime de la population mondiale tombait malade et mourait en même temps, les infrastructures des services de base – alimentation, distribution, hôpitaux, forces de police, traitement de l'eau, électricité – pourraient s'effondrer et la société se désintégrer.

Un fichier de « sauvegarde » pour la civilisation

Les effets de certaines catastrophes, comme l'impact d'un gros astéroïde ou une guerre nucléaire mondiale, seraient sans doute si destructeurs que les survivants auraient les plus grandes difficultés à se rétablir rapidement. D'autres possibilités comme les éjections de masse coronale pourraient anéantir nos infrastructures technologiques. Mais immédiatement après, l'énorme population humaine serait pour l'essentiel indemne. Par contre, il s'ensuivrait probablement une compétition acharnée pour s'approprier les ressources raréfiées, ce qui entraînerait une « décroissance secondaire » sauvage de la population. Du point de vue des survivants et de leurs efforts de reconstruction, une épidémie soudaine et virulente semble peut-être la meilleure manière de mettre fin à notre monde. Elle éliminerait la plus grande partie de la population mondiale, mais nos infrastructures et nos objets resteraient. Les communautés de survivants n'auraient qu'à fouiner

pour trouver ce dont elles ont besoin, pendant qu'elles réapprendraient les savoir-faire et les connaissances nécessaires pour redémarrer la civilisation.

Que pouvons-nous faire aujourd'hui pour préserver notre avenir en cas de catastrophe globale et d'effondrement de la civilisation ? Il existe une large communauté de gens dans le monde entier, aux États-Unis particulièrement, qui prennent très au sérieux la possibilité qu'une apocalypse survienne de leur vivant. Ces « survivalistes » font des réserves de consommables vitaux comme de la nourriture en conserve, de l'eau en bouteille, des médicaments et des armes pour se défendre. Mais qu'en est-il des connaissances requises pour faire et fabriquer tout ce dont vous auriez besoin après la disparition de la civilisation industrielle ? Nous avons mis des siècles à développer notre compréhension scientifique et nos savoir-faire techniques les plus importants. Comment pourrions-nous préserver cet ensemble de savoirs pour la postérité si jamais le bouton « reset » devait être actionné et entraîner la perte de tout ce qui n'est pas sauvegardé ? Comment pourrions-nous aider les survivants à éviter un autre âge des ténèbres et à se rétablir aussi rapidement que possible pour relancer la civilisation de zéro ?

De nos jours, de vastes trésors d'informations sont disponibles en ligne : des encyclopédies comme Wikipédia, des guides pratiques ou des vidéos explicatives sur YouTube. Mais tous ces sites sont hébergés sur le Net. Bien que conçu à l'origine comme un réseau de communications militaire robuste en cas de frappe nucléaire, le web s'évaporerait à peine l'électricité aurait-elle cessé d'être disponible pour les serveurs. (Une entrée humoristique sur le Wikipédia anglophone, intitulée « *Terminal Event Management Policy* »,

explique comment imprimer rapidement toute l'encyclopédie en ligne sur un support physique en cas de catastrophe globale imminente.) Or les contenus de Wikipédia ne sont pas organisés selon une progression logique, comme les manuels, et ils comportent peu d'informations pratiques.

Pour aider les générations futures dans le cas d'une apocalypse, nous devrions idéalement compiler une sorte de « livre total », ou une bibliothèque de volumes, qui préserverait les informations les plus utiles. Contrairement aux DVD ou aux bases de données informatisées, un livre ne nécessite pas d'autre technologie qu'une paire d'yeux pour accéder au contenu écrit et illustré. James Lovelock, qui a proposé l'hypothèse Gaia de la Terre comme système vivant autorégulé, rédigeait en 1998 un article dans lequel il déplorait que nous n'ayons « aucune compilation permanente et omniprésente de notre civilisation pour la reconstruire si elle devait s'effondrer ». Il décrit sa conception d'un « Livre pour toutes les saisons » – une sorte de manuel scolaire de sciences exhaustif et parcouru d'informations pratiques. Ancien éditeur du *Whole Earth Catalog* et fondateur du magazine *Wired*, Kevin Kelly a également suggéré un « livre éternel » ou une « bibliothèque utilitaire » : un abri souterrain construit au sommet d'une montagne reculée qui contiendrait peut-être 10 000 volumes dans lesquels seraient consignées les connaissances essentielles nécessaires pour recréer l'infrastructure et la technologie de notre civilisation. La *Long Now Foundation* est une organisation dédiée à la réflexion à long terme. Un de ses projets est de construire une horloge géante sur la face d'une montagne, autonome en énergie et capable de garder une heure précise pendant au moins 10 000 ans. Contrairement aux

autres suggestions mentionnées plus haut, les membres de la fondation ont effectivement commencé à rassembler des livres pour leur bibliothèque, baptisée « Manuel pour une civilisation » (j'ai contribué à sa mise en place et lui ai fourni un grand nombre de livres parmi lesquels, de manière fort égocentrique, mon propre ouvrage de science populaire *À Ouvrir en Cas d'Apocalypse*).

Le plus surprenant, c'est que de telles idées remontent à bien avant notre génération. Au départ, on a écrit des encyclopédies comme des recueils de toutes les informations qu'une personne instruite se devait de connaître (le mot lui-même signifie « l'ensemble des connaissances »). Or dès le 17^e siècle, avec l'explosion exponentielle des savoirs que produisaient les méthodes scientifiques d'investigation, il est devenu clair qu'une seule personne ne pouvait plus retenir tout ce qui était connu. L'idée a évolué vers un résumé des connaissances actuelles, dans un but de référencement. Mais les encyclopédistes du milieu du 17^e siècle avaient aussi une perception beaucoup plus aiguë qu'aujourd'hui de la fragilité des civilisations, même des plus grandes. Ils avaient conscience de la valeur extraordinaire des connaissances scientifiques et des savoir-faire pratiques, consignés dans l'esprit de la population et susceptibles d'être oubliés.

Denis Diderot considérait explicitement que le rôle de son *encyclopédie* de 1751 était de servir de dépôt sécurisé aux connaissances humaines. On les préservait ainsi pour la postérité, au cas où un cataclysme aurait balayé la civilisation – exactement comme les anciennes cultures des Égyptiens, des Grecs et des Romains avaient disparu, et n'avaient laissé que quelques fragments épars de leurs écrits. On avait conçu l'encyclopédie comme une

sorte de capsule qui renfermerait tous les savoirs de l'époque et les protégerait contre les assauts du temps. C'était la naissance de la notion de « livre total » idéalisé (ou du moins d'une étagère de volumes) qui explique systématiquement tout ce qui est connu ainsi que les relations entre les différents sujets. Les encyclopédistes étaient suffisamment consciencieux pour donner des détails sur les expériences qui démontraient les principes fondamentaux. Ils incluaient des illustrations sur les savoir-faire artisanaux et les connaissances pratiques. Ainsi cette encyclopédie parfaite devait fournir la quintessence condensée de tout ce qui avait été écrit sur la planète. Le tout était organisé de manière logique avec des références croisées, exactement comme il se présenterait dans l'esprit d'un être omniscient. Une seule personne n'aurait jamais pu retenir ou même comprendre une masse aussi énorme de connaissances. Mais n'importe qui pouvait s'éduquer soi-même – en principe du moins – sur tous les sujets requis, en lisant ce seul ouvrage.

Bien qu'ils soient d'un maniement aisé, les livres ont leurs propres problèmes. Humide, le papier pourrit et se délite ; sec, il s'enflamme facilement. Ce serait d'ailleurs une formidable entreprise que de construire suffisamment de librairies post-apocalypse à travers le monde, disponibles pour des groupes dispersés de survivants. Or avec la technologie moderne, nous pourrions encapsuler ces semences de redémarrage civilisationnel sous une forme beaucoup plus compacte. Avec une liseuse Kindle – ou d'autres appareils du même genre – vous pouvez tenir 10 000 livres dans la paume de votre main : une bibliothèque du savoir complète. Mais quand surviendra l'apocalypse et que le réseau électrique sera

hors service, vous ne pourrez pas recharger votre liseuse à une prise murale. Vous ferez alors une expérience exaspérante, avec tout le savoir humain à portée de main mais sans pouvoir y accéder. Pour résoudre ce problème, j'ai modifié un Kindle en version résistante à l'apocalypse – un appareil muni de toutes les connaissances nécessaires pour redémarrer la civilisation, protégé dans un étui renforcé qui intègre des panneaux solaires.

Vous avez maintenant une bibliothèque entière de savoirs pratiques en un format portable. Quand la batterie s'épuise, vous la laissez simplement se charger au soleil. L'écran et les cellules solaires finiront par se dégrader, bien sûr, mais à ce moment-là votre communauté devrait être sur la voie du rétablissement. Grâce aux instructions pour fabriquer vos propres papier, encre et imprimante rudimentaire, vous pourrez consigner tout le contenu de votre appareil dans le format *low-tech* d'un livre traditionnel.

Une société qui fonctionne ne se résume pas aux connaissances requises pour faire et fabriquer ce dont on a besoin. On doit aussi disposer des moyens et des outils. C'est pourquoi Marcin Jakubowski a suivi une voie légèrement différente. Il a conçu et construit un assortiment de machineries astucieusement interdépendantes. Quand il sera fini, le *Global Village Construction Set* constituera un ensemble de plans de construction en accès libre, pour cinquante pièces d'équipement complémentaires, à même de fournir toutes les infrastructures nécessaires à une communauté autosuffisante. Ces instruments vont des plus simples au plus complexes : un four, une scierie, une installation de forage, un moteur à vapeur alimenté par du biocarburant renouvelable, une éolienne, un appareil pour extraire l'aluminium de l'argile, un four à

induction pour fondre l'acier... Les plans permettront de soutenir l'agriculture, la production d'énergie, les transports et les manufactures. Très intelligemment, les cinquante modules de base comprendront tout ce dont vous aurez besoin pour réparer ou fabriquer n'importe quelle machine de l'ensemble. L'objectif avoué de Jakubowski est d'aider les communautés dans les pays en voie de développement et de décentraliser les moyens de production. Mais il est clair que ces spécifications – une collection de machines complémentaires, capables de fabriquer tout ce qui est nécessaire à une société autonome – sont précisément celles qui sont requises pour redémarrer une communauté dans un monde post-apocalyptique.

Si nous considérons avec sérieux la possibilité d'une future catastrophe globale et d'un soudain effondrement du monde industrialisé, nous devrions prendre des dispositions pour préserver l'essentiel de nos accomplissements ; les connaissances scientifiques et savoir-faire technologiques les plus importants que nous avons mis des siècles à accumuler au cours de l'Histoire. Ce serait une sorte de fichier de sauvegarde de toute notre civilisation. Il permettrait aux survivants de redémarrer le plus rapidement possible une société autonome.

18 Téléportation et voyages dans le temps

Jim Al-Khalili

Pour ce dernier chapitre, je me montrerai délibérément provocateur. Parmi les prédictions énoncées dans ce livre, une bonne partie se réalisera presque inévitablement dans un futur assez proche – dans une certaine mesure c'est déjà le cas pour nombre d'entre elles. D'autres, plus lugubres, décrivent un avenir que nous devons nous employer ou, tout du moins, nous préparer à éviter. Mais que dire du futur très lointain, celui qui surviendra peut-être après que nous ayons quitté notre planète et colonisé le cosmos ? A-t-on la moindre chance de concrétiser des concepts qui sont encore clairement de l'ordre de la science-fiction ? J'avais un vaste choix de sujets à ma disposition, de la télépathie aux voyages supraluminiques. J'en ai sélectionné deux parmi mes favoris. Il est à peu près certain qu'ils ne deviendront pas une réalité de mon vivant. Mais dans un futur lointain... qui sait ?

Téléportation

L'idée essentielle de la téléportation est le transfert de la matière d'un point à un autre, sans qu'elle traverse l'espace physique entre les deux points. Depuis plus longtemps que vous ne pourriez le penser, il s'agit d'un thème récurrent des livres, films et jeux vidéo de

science-fiction. Écrit en 1877, le roman d'Edward Page Mitchell, *The Man without a Body* – l'homme sans corps – est la plus ancienne histoire avérée où apparaît la téléportation. Un savant invente une machine qui peut décomposer un corps vivant en tous les atomes qui le constituent. Ces derniers sont convertis en courant électrique et envoyés par liaison filière vers un récepteur où ils sont réassemblés. C'est fascinant, notamment parce que ce récit date d'avant la découverte de l'électron, à une époque où nous ne comprenions pas clairement la nature de l'atome.

Déplaçons-nous un demi-siècle plus tard, en 1929. Arthur Conan Doyle publie une nouvelle intitulée *The Disintegration Machine* à propos d'une machine capable de décomposer et de réassembler la matière. Comme se le demande l'un des personnages de l'histoire, « Pouvez-vous imaginer un procédé par lequel un être organique, comme vous, serait en quelque sorte dissous dans le cosmos, puis à nouveau assemblé par une subtile inversion des conditions ? » Deux ans plus tard, l'écrivain américain Charles Fort inaugurerait le terme de « téléportation » pour expliquer de mystérieuses disparitions de personnes et d'objets, supposés réapparaître ailleurs. De tels incidents faisaient partie des nombreuses « anomalies » – les fameux phénomènes « fortéens » – que l'auteur étudiait, parmi d'autres phénomènes paranormaux et surnaturels hors de portée du savoir scientifique accepté.

En 1958, le film américain d'horreur et de science-fiction *La Mouche noire* introduisait pour la première fois l'idée moderne de téléporteur auprès du grand public. Dans ce film, un chercheur mélange par mégarde son ADN avec celui d'une mouche qui est entrée avec lui dans la cabine de téléportation. Mais pour beaucoup

d'entre nous, le téléporteur a connu sa plus célèbre et sa plus durable incarnation fictionnelle dans le vaisseau de l'Enterprise, avec cette fameuse réplique « téléporte-moi, Scotty ». Le créateur de Star Trek, Gene Roddenberry, a eu cette idée au milieu des années 1960 pour économiser sur les effets spéciaux. Plutôt que de transporter par navette les passagers de l'Enterprise à la surface d'une planète, il était plus facile et meilleur marché de les faire disparaître puis réapparaître.

Très bien, direz-vous, mais que dit la science sérieuse à ce sujet ? Transporter de la matière d'un endroit à un autre sans passer à travers l'espace intermédiaire : cette idée apparemment ridicule est tout à fait normale – pourvu que l'on se situe au niveau quantique. Un processus appelé effet tunnel permet aux particules subatomiques, comme les électrons, de sauter d'un emplacement à l'autre même si elles n'ont pas assez d'énergie pour le faire. Un peu comme si vous lanciez une balle contre un mur en brique, et qu'elle disparaissait et réapparaissait de l'autre côté tout en laissant le mur intact. Ce n'est pas du tout de la science-fiction. Et pour cause. Le Soleil brille et permet la vie sur Terre grâce à la faculté des atomes d'hydrogène de fusionner entre eux par effet tunnel, à travers ce qui devrait être un impénétrable champ de force.

Mais il existe une prédiction encore plus intéressante et contre-intuitive de la mécanique quantique, vérifiée expérimentalement à de nombreuses reprises. C'est l'idée d'intrication décrite dans le chapitre 11 de Winfried Hensinger sur les ordinateurs quantiques. Deux particules ou plus, séparées dans l'espace, sont connectées entre elles de telle sorte que toute mesure ou perturbation de l'une d'elles affecte instantanément ses partenaires. Ce phénomène est

en apparente infraction avec la théorie de la relativité d'Einstein et la limite de la vitesse de la lumière. En mécanique quantique, on l'explique en termes de particules intriquées : elles font partie d'un seul système, plutôt que d'être des entités séparées.

Considérez l'analogie suivante. Vous avez une paire de gants. Mettez chacun d'eux dans une boîte séparée, gardez l'une d'elles près de vous et envoyez l'autre dans un lieu éloigné. Vous ouvrez la boîte que vous avez gardée et vous y voyez le gant gauche : vous savez immédiatement que l'autre conteneur contient le gant droit. Bien sûr, il n'y a rien de mystérieux à cela. C'est simplement l'état de votre connaissance qui a changé : l'autre boîte a toujours contenu le gant droit. Mais dans le monde quantique, les gants sont remplacés par des particules intriquées, toutes capables de changer de spin (de tourner, en quelque sorte) simultanément dans un sens et dans l'autre. C'est la superposition quantique. En ouvrant la boîte que vous avez gardée, vous effectuez une mesure quantique, et forcez l'objet à « décider » dans quel sens orienter son spin. Après tout, on ne voit jamais de particule tourner dans deux directions à la fois – ce serait ridicule, n'est-ce pas ? Mais la mécanique quantique affirme – et les expériences confirment – que de telles superpositions quantiques sont réelles. De plus, à peine avez-vous ouvert la boîte pour observer la particule que sa partenaire dans l'autre boîte quitte immédiatement son état de superposition : elle ne tourne plus dans deux sens à la fois, mais dans un seul, opposé à celui de la première particule. Tout se passe comme si l'action d'ouvrir votre boîte avait instantanément transmis un signal quantique à l'autre particule pour lui dire comment se comporter.

Les idées de superposition et d'intrication conduisent naturellement à la notion de téléportation quantique. Mais est-ce réalisable en pratique ? Dans les grandes lignes, l'idée repose sur une paire de particules intriquées dans les deux lieux. Vous scannez l'objet que vous souhaitez téléporter de telle sorte qu'il soit possible de transporter de la pure information à distance via la paire intriquée.

Mais téléporter ne serait-ce qu'un seul atome requiert de connaître entièrement son état quantique. Vous devez tout savoir de lui. Tout d'abord, on pensait que cela serait impossible, en vertu d'un principe fondamental appelé le Principe d'incertitude de Heisenberg, qui stipule que l'on ne peut jamais observer un système quantique et tout savoir de lui pour le reconstruire ailleurs. Mais l'intrication quantique apporte une solution à ce problème parce qu'une partie de l'information est transmise instantanément au niveau quantique. On la complète par l'information que nous obtenons par des mesures et on l'envoie séparément. On utilise l'information combinée (celle transmise par la mécanique quantique à l'aide de la paire intriquée, et celle obtenue par une observation et envoyée séparément à la vitesse de la lumière) pour reconstruire à l'autre bout l'objet originel avec de mêmes matières premières.

Dirigée par le chercheur d'IBM Charles Bennett, une équipe internationale de six scientifiques a montré pour la première fois en 1993 que l'on pouvait transférer à distance l'état d'une particule à l'aide de l'intrication quantique. L'expérience a donné naissance à l'idée moderne de téléportation quantique. Depuis, les chercheurs ont intriqué toujours plus d'atomes. Bien sûr, s'il est possible de téléporter quelques photons ou une poignée d'atomes (des atomes de certains gaz refroidis à des températures proches du zéro

absolu), le problème devient tout autre s'il s'agit de transférer la quantité stupéfiante d'information requise pour décrire l'arrangement exact des milliards de milliards de milliards d'atomes qui composent un corps humain.

Notons également que ce qu'on parviendrait à faire avec la téléportation va au-delà d'une simple réplique de l'original. Au niveau quantique tout du moins, le transfert de toute l'information de la particule équivaut au transfert la particule elle-même : nous n'avons pas besoin de l'envoyer physiquement. Mais soyez conscient que pour téléporter un objet, il faut détruire l'original au point A avant qu'il ne puisse être reconstruit au point B. Ceci étant dit, de récents travaux préliminaires sur la « téléportation particulaire » suggèrent qu'il pourrait même être possible un jour de téléporter quantiquement l'objet lui-même.

Gardez à l'esprit qu'il reste encore probablement quelques siècles avant que n'apparaisse la technologie imaginée dans Star Trek.

Voyage dans le temps

Tandis que la téléportation repose sur des idées issues de la mécanique quantique – la théorie de la matière à très petite échelle – les voyages temporels font appel aux concepts de la théorie qui décrit l'Univers aux plus grandes échelles : la théorie de la relativité générale d'Einstein.

La relativité générale offre la meilleure et la plus précise des descriptions actuelles sur l'espace et le temps. Et comme elle n'élimine pas totalement la possibilité des voyages temporels, nous

pouvons sérieusement aborder le sujet. Elle stipule que la matière et l'énergie peuvent déformer et distordre l'espace et le temps. En fait, les mathématiques de la relativité générale autorisent l'existence de formes exotiques d'espace-temps, comme les trous noirs et les trous de ver. Dans le cas qui nous concerne, une idée particulièrement pertinente est ce qu'on appelle la « boucle spatio-temporelle fermée de type temps ». C'est un chemin circulaire à travers l'espace-temps courbé, dans lequel le temps se replie sur lui-même. Si vous empruntez ce chemin, vous ferez une expérience normale du temps s'écoulant vers le futur. Vous retournerez finalement à votre endroit de départ, mais avant même le moment de votre départ – vous déplaçant ainsi vers le passé. De telles boucles spatio-temporelles fondent la plupart des idées théoriques sur les voyages temporels.

Bien que nombre de scientifiques considèrent les boucles spatio-temporelles comme contraires à la physique, certains hésitent à en exclure trop rapidement la possibilité. En 1937, le mathématicien W.J. van Stockum fournissait la première solution des équations d'Einstein de la relativité générale qui incluait une boucle spatio-temporelle. Elle fait appel à l'idée hypothétique d'un cylindre infiniment long, constitué de matière très dense et qui tournerait très rapidement dans un espace vide. Les mathématiques qui décrivent ce scénario prédisent qu'aux abords du cylindre, la région de l'espace-temps s'enroulerait autour de lui et pourrait former une boucle spatio-temporelle. Malheureusement, un tel cylindre ne pourrait pas exister physiquement. Il affecterait l'Univers entier en conférant à l'espace-temps de très étranges propriétés – et nous savons que le vrai Univers ne présente pas ces propriétés.

En 1949, le mathématicien Kurt Gödel, qui travaillait avec Einstein à l'*Advanced Study Institute* de l'Université Princeton, a élaboré un autre scénario hypothétique présentant des boucles temporelles, entièrement cohérent avec la relativité générale. Mais la plupart des physiciens, tant à l'époque que de nos jours, pensent que les paradoxes logiques que soulèvent les voyages dans le passé sont suffisants pour les exclure. Ils sont d'avis qu'avec une meilleure compréhension, nous finirons par combler les failles des lois physiques admettant la possibilité de tels phénomènes. Peut-être y parviendrons-nous grâce à une théorie unifiée de la gravité quantique qui réunirait les deux plus importantes théories de la physique : la mécanique quantique et la relativité générale. Jusqu'à présent nous ne sommes pas parvenus à élaborer une telle « Théorie du tout », comme on l'appelle couramment. Mais on y travaille.

Dans les années 60 et 70, plusieurs physiciens qui étudiaient les solutions de la relativité générale ont émis de nombreux autres modèles théoriques comprenant des boucles temporelles. Tous faisaient intervenir des corps en rotation qui distordaient l'espace autour d'eux. Le plus connu de ces modèles était l'œuvre de Frank Tipler. En 1974, il a publié un article dans lequel il poussait un peu plus loin l'idée de cylindre en rotation de W.J. van Stockum. Il a montré que le cylindre devrait mesurer 100 km de long pour un diamètre de 10 km, et qu'il devrait être fait d'un matériau exotique, exceptionnellement dense. Il serait extraordinairement solide et rigide pour que les énormes contraintes gravitationnelles ne l'écrasent pas dans le sens de la longueur. Il résisterait à une force centrifuge stupéfiante qui tendrait à éjecter toute sa matière vers

l'extérieur – sa rotation entraînerait une vitesse de surface d'environ la moitié de celle de la lumière. En dépit de tous ces obstacles, Frank Tipler soulignait à juste titre qu'il ne s'agissait que de problèmes pratiques, et qu'une technologie suffisamment avancée pourrait les résoudre.

Comment pourrions-nous utiliser un cylindre de Tipler comme machine à voyager dans le temps ? L'idée, c'est que vous voyagez dans l'espace jusqu'au cylindre en rotation. Vous effectuez quelques orbites autour de lui puis rentrez sur Terre, mais dans le passé – avec un peu de chance. Plus vous effectuez d'orbites, plus vous remontez le temps. Vous sentez le temps s'écouler normalement en rotation autour du cylindre, mais en dehors de cette zone courbée de l'espace-temps, vous vous déplacez vers le passé. C'est un peu comme gravir un escalier en colimaçon *vers le haut*, et aboutir chaque fois au palier situé *en dessous* du dernier.

Vous devez penser qu'une telle expérience demande une maîtrise de la matière à une échelle inconcevable. Néanmoins il est possible que des cylindres de Tipler existent déjà naturellement dans l'espace. Si c'est le cas – et c'est un point discutable – ils portent le nom de cordes ou filaments cosmiques. D'après certains scientifiques, ce pourrait être des restes du Big Bang. Ils pourraient consister en des boucles fermées, ou encore s'étendre à travers tout l'univers. Leur épaisseur serait inférieure à celle d'un atome, mais ils seraient si denses qu'un seul millimètre pèserait un million de milliards de tonnes.

L'astrophysicien américain Richard Gott a consacré de nombreuses réflexions aux voyages temporels. Il a montré qu'avec

le bon angle, deux cordes cosmiques qui passent l'une près de l'autre à grande vitesse formeraient une boucle temporelle.

Mais en définitive, il semble que l'option de voyage temporel la plus faisable – je devrais dire la moins ridicule – soit de passer à travers un trou de ver. Ce sont des structures exotiques d'espace-temps que les équations de la relativité générale décrivent de manière théorique. Pensez aux trous de ver comme à des raccourcis dans l'espace-temps. Ils connectent deux régions distantes de l'espace par une route qui traverse une dimension parallèle à notre univers. Et comme l'espace et le temps sont intimement liés, les deux extrémités d'un trou de ver peuvent en principe relier deux époques différentes – l'une étant le passé de l'autre. En conséquence, un trou de ver pourrait permettre de voyager dans le futur ou dans le passé selon la direction choisie.

Contrairement aux trous noirs qui sont largement observés, les trous de ver restent des curiosités théoriques. Néanmoins le jour viendra peut-être où nous pourrions en construire un. Bien sûr, la tâche n'est pas à la portée de la technologie du 21^e siècle. C'est peut-être même impossible. Mais permettez-moi quelques spéculations. À la plus petite des échelles concevables, des milliards de milliards de fois plus petite que les atomes, nous trouvons ce qui s'appelle la longueur de Planck. Là, les concepts d'espace et de temps perdent leur signification et les incertitudes quantiques règnent en maître. À cette échelle, toutes les lois habituelles de la physique explosent, l'espace-temps apparaît et disparaît sous toutes les formes et distorsions possibles, dans un ballet aléatoire et chaotique. Employés pour décrire cette activité fébrile, des termes comme « fluctuations quantiques » ou « mousse quantique » ne lui

font certainement pas justice. Au sein de cette mousse, de minuscules trous de ver peuvent se manifester, puis s'évanouir très rapidement. L'idée serait d'en capturer un, puis de le faire croître de plusieurs fois sa taille, avant qu'il n'ait une chance de disparaître à nouveau.

Que pouvons-nous croire ? Pourra-t-on jamais produire des trous de ver ? Pourraient-ils servir de machine à voyager dans le temps ? Des boucles temporelles pourraient-elles se former dans notre univers et nous permettre de nous déplacer vers le passé ? La simple vérité, c'est que nous ne le savons pas encore avec certitude. Mais dans un esprit d'optimisme, je voudrais citer Frank Tipler, le physicien qui a publié le premier article sérieux sur la construction d'une machine à voyager dans le temps. Il empruntait lui-même ces paroles à l'astronome du 19^e siècle Simon Newcomb, qui a stipulé dans de nombreux articles l'impossibilité que des machines volantes plus lourdes que l'air puissent voler :

« La démonstration qu'aucune combinaison possible de substances, mécanismes et forces connus ne pourrait être assemblée en une machine fonctionnelle, grâce à laquelle les hommes pourraient [voyager dans le passé], semble à l'auteur de ces lignes aussi complète qu'il est possible de l'être pour la démonstration d'un fait physique. »

Les frères Wright ont rapidement démenti Newcomb quant aux machines volantes plus lourdes que l'air. Je me demande si, un jour, nous ne verrons pas la même chose arriver avec les voyages temporels. Certes, je ne parierais pas trop gros sur la probabilité qu'on construise un jour une machine pour nous déplacer dans le

temps. Mais ma philosophie implique qu'il est important, et bien sûr amusant, d'imaginer comment pourrait fonctionner cette machine, puisque nos meilleures théories scientifiques n'en excluent pas complètement la possibilité.

Je vais clore ce chapitre avec une spéculation stimulante que beaucoup de physiciens théoriciens commencent à considérer sérieusement. Il se peut... il se peut seulement... que la téléportation et les voyages dans le temps soient intimement liés. Une nouvelle idée, que les physiciens expriment par la formule $ER = EPR$, suggère qu'il pourrait exister un lien subtil et profond entre l'intrication quantique (la téléportation) et les trous de ver (les voyages temporels). Publiés en 1935 par Einstein et ses collaborateurs et considérés jusqu'à présent comme sans rapport, deux articles pourraient en définitive décrire le même concept. Le papier EPR (des initiales de ses trois auteurs : Einstein, Podolsky et Rosen) était le premier à relever l'étrangeté de l'intrication quantique, quand deux particules distantes se connectent instantanément. Einstein estimait impossible cette notion, qui ne devait que témoigner de notre compréhension incomplète de la théorie quantique. Le second papier (ER, pour Einstein et Rosen seulement) était le premier travail qui décrivait le concept de trou de ver, connu à l'époque sous le nom d'*Einstein-Rosen bridge* – pont d'Einstein-Rosen.

Plus de quatre-vingts ans après la publication de ces deux articles, nous nous posons cette question audacieuse : et si les paires de particules intriquées étaient en fait capables de « communiquer » entre elles *précisément* parce qu'elles sont reliées par un trou de ver ? Plus je lis et plus je pense à cette idée un peu

folle, et plus elle me plaît. C'est tellement élégant. Ainsi les trous de ver, en faisant l'hypothèse qu'ils soient physiquement possibles, bien sûr, pourraient servir à la fois de téléporteurs et de machines à voyager dans le temps. Ne serait-ce pas la chose la plus extraordinaire qui soit ?

Pour l'instant, il va de soi que le sujet de ce chapitre appartient clairement au domaine de la science-fiction – ainsi qu'aux équations mathématiques des physiciens théoriciens les plus hardis.

Quel que soit le fin mot de l'histoire, je suis profondément convaincu que les sciences nous réservent encore de nombreuses surprises dans les décennies et les siècles à venir.

Et donc, utilisons nos connaissances avec sagesse.

Pour en savoir plus

L'AVENIR DE NOTRE PLANÈTE

En français

Le futur : Six logiciels pour changer le monde, Al Gore, Éditions de la Martinière, 2013

Homo deus : Une brève histoire de l'avenir, Yuval Noah Harari, Albin Michel, 2017

En anglais

Adventures in the Anthropocene : A Journey to the Heart of the Planet, Gaia Vince, Vintage, 2016

Climate Change (What Everyone Needs to Know), Joseph Romm, Oxford University Press, 2015

Population 10 billion, Danny Dorling, Constable, 2013

Scale : The Universal Laws of Life and Death in Organismes, Cities and Companies, Geoffrey West, Weidenfeld & Nicolson, 2017

Smart Cities, Digital Nations : Building Smart Cities in Emerging Countries and Beyond, Caspar Herzberg, Roundtree Press, 2017

Tomorrow's World : A Look at the Demographic and Socio-Economic Structure of the World in 2032, Clint Laurent, Wiley, 2013

L'AVENIR DE L'HUMAIN

En français

Il était une fois le gène, Siddhartha Mukherjee, Flammarion, 2017

Superintelligence, Nick Bostrom, Dunod, 2017

En anglais

Citizen Cyborg : Why Democratic Societies Must Respond to the Redesigned Human of the Future, James Hugues, Basic Books, 2004

Creation : The Origin of Life / The Future of Life, Adam Rutherford, Penguin, 2014

Happy-People-Pills for All, Mark Walker, Wiley, 2013

Life at the Speed of Light : From the Double Helix to the Dawn of Digital Life, J.Craig Venter, Viking, 2013

The Patient Will See You Now : The Future of Medicine Is in Your Hands, Eric Topol, Basic Books, 2016

Spillover : Animal Infections and the Next Human Pandemic, David Quammen, Vintage, 2013

L'AVENIR EN LIGNE

En français

La singularité technologique, Murray Shanahan, FYP Éditions, 2017

En anglais

AI : Its Nature and Future, Margaret A. Boden, Oxford University Press, 2016

Cloud Computing, Nayan B. Ruparelia, MIT Press, 2016

Computing with Quantum Cats : From Colossus to Qubits, Bantam Press, John Gribbin, 2014

Enchanted Objects : Design, Human Desire and the Internet of Things, Scribner, David Rose, 2015

The Economic Singularity : Artificial intelligence and the death of capitalism, Calum Chace, Three Cs, 2016

CRÉER L'AVENIR

The Industries of the Future, Alec Ross, Simon & Schuster, 2017

Innovation and Disruption at the Grid's Edge, Fereidoon Sioshansi (ed.), Academic Press, 2017

Made to Measure : New Materials for the 21st Century, Philip Ball, Princeton University Press, 1999

Stuff Matters : The Strange Stories of the Marvellous Materials that Shape Our Man-made World, Mark Miodownik, Penguin, 2014

We Do Things Differently : The Outsiders Rebooting Our World, Mark Stevenson, Profile, 2017

L'AVENIR LOINTAIN

En français

À ouvrir en cas d'apocalypse, Lewis Dartnell, JC Lattès, 2015

Une brève histoire du futur : Comment la science va changer le monde, Michio Kaku, Flammarion, 2014

En anglais

Black Holes, Wormholes and Time Machines, Jim Al-Khalili, CRC Press, 2012

Emigrating Beyond Earth : Human Adaptation and Space Colonization, Cameron M. Smith, Springer, 2012

Global Catastrophic Risks, Nick Bostrom and Milan M. Cirkovic, Oxford University Press, 2011

Packing for Mars : The Curious Science of Life in Space, Mary Roach, Oneworld, 2011

Les auteurs

Jim Al-Khalili, Anglais d'origine irakienne, officier de l'Ordre de l'Empire britannique, est physicien, producteur d'émissions scientifiques et auteur. Il est actuellement professeur en physique théorique et titulaire de la chaire *Public Engagement in Science* à l'Université du Surrey. En parallèle de ses recherches académiques en physique nucléaire et biologie quantique et de ses publications à destination du grand public, il a animé de nombreuses émissions scientifiques à la télévision et à la radio, parmi lesquelles le programme hebdomadaire *The Life Scientific* à la BBC Radio 4. Il a reçu en 2007 le prix Michael Faraday de la Royal Society et a été en 2016 le premier lauréat de la médaille Stephen Hawking pour la diffusion de la science.

Philip Ball est écrivain et éditeur. À la fois physicien et chimiste, il a fait partie pendant de nombreuses années du comité éditorial de la revue *Nature*. Il écrit régulièrement sur la science et ses interactions avec les arts et la culture. Parmi ses ouvrages les plus connus on compte : *Bright Earth : Art and the Invention of Color* ; *The Music Instinct : How Music Works and Why We Can't Do Without It* ; *Curiosity : How Science Became Interested in Everything* ; et *Invisible : The Dangerous Allure of the Unseen*. Son livre *Critical Mass : How One Thing Leads to Another* a reçu en 2005 le Prix Aventis pour les livres de science. Il est actuellement présentateur

de l'émission *Science Stories* à la BBC radio 4 ; son livre le plus récent est *The Water Kingdom : A Secret History of China*.

Margaret A. Boden, officier de l'Ordre de l'Empire britannique, est professeure et chercheuse en sciences cognitives à l'Université du Sussex, où elle a contribué à mettre en place le premier programme universitaire au monde en sciences cognitives. Elle est titulaire de plusieurs diplômes en médecine, philosophie et psychologie, disciplines qu'elle met à profit dans ses recherches en intelligence artificielle. Elle est membre de l'Académie britannique (*Fellow of the British Academy*), de l'Association pour l'avancement de l'intelligence artificielle, et de ses équivalents britannique et européen. Ses travaux ont été traduits en 20 langues. Son ouvrage le plus récent est *Artificial Intelligence : Its Nature and Future*.

Naomi Climer est ingénieure et spécialiste des technologies de la communication et la radiodiffusion. Durant sa carrière, elle a travaillé pour la BBC, ITV et Sony en Europe et aux États-Unis. Naomi est l'ancienne Présidente de l'*Institution of Engineering and Technology* (IET), membre du Conseil d'administration de la *National Film and Television School* (NFTS), Directrice du *Council of the International Broadcasting Convention* (IBC) et consultante auprès du Centre de technologie de Sony au Royaume-Uni.

Lewis Dartnell est chercheur en astrobiologie à l'Université de Westminster à Londres. Ses recherches visent à étudier comment la vie microbienne et les signes de son existence pourraient persister à la surface de Mars en dépit du bombardement cosmique, et

comment nous pourrions les détecter. Lewis est fréquemment l'invité d'émissions de radio et de télévision consacrées à la science. Il est notamment l'auteur de *Life in the Universe : A Beginner's Guide* et *The Knowledge : How to Rebuild Civilization in the Aftermath of a Cataclysm* (<http://the-knowledge.org>), choisi comme un des livres de l'année par le *Sunday Times*.

Jeff Hardy est *Senior Research Fellow* à l'Institut Grantham sur le changement climatique et l'environnement à l'Imperial College de Londres. Ses recherches portent sur ce que pourraient être les futures sources d'énergie peu carbonée, comment elles modifieront nos vies et quelles entreprises elles impliqueront. Il était auparavant responsable des énergies durables du futur au sein de l'organisme britannique de régulation de l'énergie Ofgem, et Directeur scientifique de l'Atelier III du GIEC. Il a également travaillé au *UK Energy Research Center*, à la *Royal Society of Chemistry*, au *Green Chemistry Group* de l'université de York, ainsi qu'à Sellafield en tant que chimiste dans un laboratoire nucléaire.

Winfried K. Hensinger est professeur en technologies quantiques à l'Université du Sussex. Il a obtenu son doctorat à l'Université du Queensland, à Brisbane (Australie). Sa thèse a mis en évidence de nouveaux et étranges effets quantiques à partir d'atomes ultra-froids. Il a effectué une partie de ses recherches doctorales au sein du *National Institute of Standards and Technology* (NIST) à Gaithersburg (Maryland, USA) dans le groupe du professeur William Phillips, lauréat du prix Nobel de physique 1997 avec Steven Chu et Claude Cohen-Tannoudji. Il dirige aujourd'hui le *Sussex Ion*

Quantum Technology Group ainsi que le *Sussex Centre for Quantum Technologies*. Il a récemment publié le premier plan détaillant la réalisation d'un ordinateur quantique à grande échelle, ce à quoi son groupe s'emploie actuellement.

Adam Kucharski est professeur assistant à la *London School of Hygiene & Tropical Medicine*, où il travaille sur l'émergence et la propagation des maladies infectieuses. Il a effectué ses études à l'Université de Warwick, avant d'obtenir un doctorat en mathématiques à l'Université de Cambridge. Kucharski a écrit dans *l'Observer*, le *New Scientist* et *Wired*. Il a reçu en 2012 le prix *Wellcome Trust Science Writing* pour ses articles. Son premier livre, *The Perfect Bet : How Science and Math Are Taking the Luck Out of Gambling* a été publié en 2016.

John Miles est membre de l'Emmanuel College à Cambridge et professeur en stratégies de transition énergétique, titulaire de la chaire *Arup/Royal Academy of Engineering* au département d'ingénierie. Ses recherches portent sur la technologie et l'analyse économique des futurs systèmes de transport, et tout particulièrement leurs rendements énergétiques et leurs impacts environnementaux. Il a été le fondateur et premier directeur du groupe de travail sur la mobilité intelligente au sein du Conseil pour l'industrie automobile au Royaume-Uni (*UK Automotive Council*). Il était plus particulièrement en charge du plan de développement de la mobilité intelligente pour le Conseil et a produit plusieurs autres rapports en lien avec ce sujet.

Anna Ploszajski est ingénieure, chercheuse en science des matériaux, et vulgarisatrice scientifique. Elle se produit régulièrement sur scène, dans des *stand-up* comiques sur les matériaux, et produit un podcast intitulé *'rial talk*. Elle écrit également des articles consacrés aux merveilles des matériaux pour des publications comme *Materials World*. En 2017, Anna a remporté le prix « Jeune ingénieur de l'année » décerné par l'Académie royale d'ingénierie, et est arrivée en finale de *FameLab* au Royaume-Uni. Durant ses loisirs, elle joue de la trompette et s'entraîne pour traverser la Manche à la nage.

Aarathi Prasad écrit sur des sujets liés à sa formation universitaire en biologie moléculaire. Elle a également produit et présenté des documentaires scientifiques pour les chaînes de télévision ou de radio BBC 1, BBC Radio 4, National Geographic et Discovery Channel. Elle publie des articles dans un grand nombre de journaux et magazines ; elle est également l'auteur de deux ouvrages : *In the Bonesetter's Waiting-Room : Travels Through Indian Medicine* et *Like a Virgin : How Science Is Redesigning the Rules of Sex*.

Louisa Preston est chercheuse en astrobiologie au sein de la branche britannique du programme Aurora de l'Agence spatiale européenne, basée à Birkbeck, Université de Londres. Elle a travaillé pour la NASA et les agences spatiales canadienne, européenne et britannique. Elle consacre ses recherches à l'étude des environnements terrestres où la vie est capable de se maintenir dans des conditions extrêmes, afin d'extrapoler ces données aux possibles formes d'habitat et de vie extraterrestres. Elle a fait une

présentation sur la recherche de la vie sur Mars lors d'une Conférence TED de 2013. Son premier livre, *Goldilocks and the Water Bears : The Search for Life in the Universe*, est publié par Bloomsbury Sigma.

Adam Rutherford est généticien, écrivain et producteur d'émissions. Il présente la principale émission scientifique de la BBC Radio 4, *Inside Science*, et nombre d'autres programmes à la télévision et à la radio. Il a aussi été conseiller scientifique de plusieurs films, dont *World War Z* (2013), et *Ex Machina* d'Alex Garland (2015), qui a remporté l'Oscar des meilleurs effets visuels en 2016. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages parmi lesquels *A Brief History of Everyone Who Ever Lived : The Stories of Our Genes*.

Noel Sharkey est professeur émérite d'IA et de robotique à l'université de Sheffield, codirecteur de la *Foundation for Responsible Robotics* et président de l'ONG *International Committee for Robot Arms Control*. Il a également été juge principal dans la série d'émissions de la BBC, *Robot Wars*, dans lesquelles des robots s'affrontent. Noel est un esprit aux centres d'intérêt variés ; il est passé par plusieurs disciplines universitaires, comme la psychologie, l'informatique, l'IA, la linguistique, l'apprentissage machine, l'ingénierie, la robotique et l'éthique de la technologie. Il a eu des charges d'enseignement et de recherche aux États-Unis (Yale et Stanford) et au Royaume-Uni (Essex, Exeter et Sheffield).

Julia Slingo, membre de la *Royal Society*, est une météorologue britannique spécialiste du climat. Elle a été directrice scientifique de

l'Office national britannique de météorologie (*Met Office*) entre 2009 et 2016. Tout au long de sa carrière, elle a développé des approches innovantes pour comprendre et prédire le temps et le climat à l'aide de modèles complexes. Ces centres d'intérêt portent plus particulièrement sur la météorologie tropicale et la variabilité climatique. Julia a été élue *Fellow of the Royal Society* en 2015 et membre étranger de la *US National Academy of Engineering* en 2016.

Gaia Vince est écrivaine et productrice spécialisée dans la science, la société et l'environnement. Elle a fait partie des comités éditoriaux de *Nature Climate Change*, *Nature* et *New Scientist*. Elle écrit pour des journaux et magazines au Royaume-Uni, aux États-Unis et en Australie, et présente des émissions scientifiques à la radio et à la télévision. Son premier livre, *Adventures in the Anthropocene : A Journey to the Heart of the Planet We Made*, a remporté en 2015 le prix Winton des livres de sciences, décerné par la *Royal Society*.

Mark Walker est professeur au département de philosophie de l'Université du Nouveau-Mexique, où il est titulaire de la chaire Richard L. Hedden d'études philosophiques avancées. Son premier livre, *Happy-People-Pills for All* (2013), soutient l'idée de créer des médicaments pour améliorer le bonheur de la population. Son ouvrage le plus récent, *Free Money for All* (2015), prend position en faveur d'un revenu de base inconditionnel de 10 000 dollars par an pour tous les citoyens américains.

Alan Woodward a commencé sa carrière en tant que physicien, avant de devenir expert en informatique dans le cadre de ses travaux de recherche en troisième cycle. Après plusieurs années passées à travailler pour le gouvernement britannique, puis dans le privé, il est aujourd'hui professeur invité à l'Université du Surrey, tout en continuant à conseiller des organisations comme Europol. Alan est surtout connu pour ses travaux en cybersécurité, de la physique quantique à l'informatique.